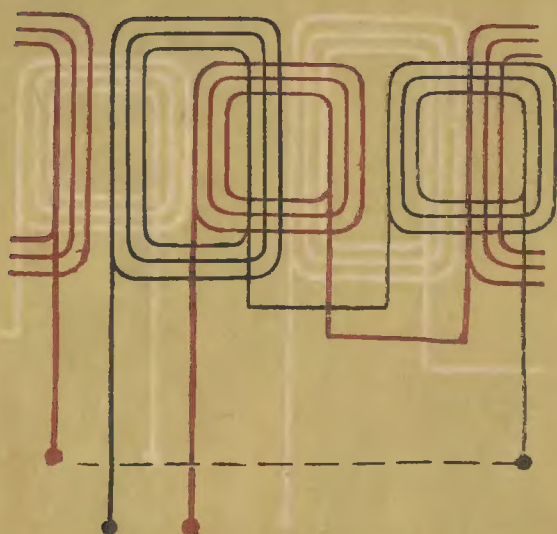


Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Е. Л. МАРШАК
Р. Б. УМАНЦЕВ

СХЕМЫ ОБМОТОК СТАТОРОВ



Выпуск 213

Е. Л. МАРШАК и Р. Б. УМАНЦЕВ

СХЕМЫ ОБМОТОК СТАТОРОВ



«ЭНЕРГИЯ»

Москва — 1967

621.313

Редакционная коллегия:

Большам Я. М., Долгов А. Н., Ежков В. В., Камиинский Е. А.,
Мандрыкин С. А., Сиичугов Ф. И., Смириов А. Д., Устинов П. И.

Маршак Е. Л. и Уманцев Р. Б.

М 25 Схемы обмоток статоров. М., «Энергия», 1967.
88 с. с илл. (Б-ка электромонтера. Вып. 213). 15 000 экз.
16 к.

Рассматриваются схемы обмоток статоров синхронных и асинхронных электрических машин. Приводятся классификация, электрические параметры и характеристики схем однослойных и двухслойных обмоток. В доступной форме освещаются условия их выполнения. Описываются и приводятся примеры составления развернутых и упрощенных схем обмоток. Рассчитана на электромонтеров по эксплуатации, электрообмотчиков и мастеров по ремонту электрических машин.

3-3-10
111-67

6П2.12

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Принцип действия электрических машин постоянного и переменного тока основан на физических законах взаимодействия магнитного поля и проводника с током, помещенного в это поле, и явлениях, возникающих при движении проводника в магнитном поле.

В электрических генераторах — машинах, преобразующих механическую энергию в электрическую, при пересечении магнитными силовыми линиями проводников в последних возбуждается (индуцируется) электродвижущая сила (э. д. с.).

Величина индуцированной в проводнике э. д. с. зависит от интенсивности магнитного поля, длины проводника, относительной скорости его движения в магнитном поле и находится с этими величинами в следующей зависимости:

$$e = BlvC_e, \text{ в,}$$

где B — величина магнитной индукции, гс;

l — длина проводника, пересекаемого магнитными силовыми линиями, см;

v — относительная скорость движения проводника в магнитном поле (т. е. либо скорость движения проводника в неподвижном магнитном поле, либо скорость движения магнитного поля по отношению к неподвижному проводнику, либо относительная скорость движущегося магнитного поля к движущемуся проводнику), см/сек;

C_e — коэффициент, учитывающий характер изменения магнитного поля по длине проводника, а также угол между направлениями движения проводника и поля.

В генераторах переменного тока магнитное поле образуется полюсами вращающегося с постоянной скоростью электромагнита — ротора генератора. Провод-

ники, в которых индуктируется э. д. с., помещаются в пазах статора генератора. Величина и изменение индуктируемой в этих проводниках э. д. с. зависит от величины и изменения магнитного поля, проходящего через эти проводники, и характеризуется формой кривой поля. В генераторах, вырабатывающих переменный ток промышленной частоты, наиболее благоприятной формой кривой является синусоида.

При синусоидальном магнитном поле повышается использование активных частей машины (магнитопровода и обмоток) и снижается величина дополнительных потерь. В соответствии с этим и конструируются магнитопроводы и обмотки статора и ротора.

В любой момент времени величина переменной э. д. с., индуктированной синусоидальным полем в проводнике, может быть определена:

$$e = E_{\text{макс}} \sin \alpha,$$

где максимальное значение э. д. с. $E_{\text{макс}} = B_{\text{макс}} l v \cdot 10^{-8}$, в;
 α — угол поворота ротора относительно проводника, в котором определяется мгновенное значение э. д. с., *эл. град.*

В свою очередь значение $E_{\text{макс}}$ связано с действующим значением э. д. с. соотношением:

$$E_{\text{действ}} = \frac{E_{\text{макс}}}{\sqrt{2}}.$$

ГОСТ 183-55 регламентируется степень синусоидальности напряжения на зажимах генератора: изменение напряжения по времени при холостом ходе должно происходить по кривой, у которой ни одна из ординат не должна отличаться от соответствующей ординаты основной синусоиды больше чем на 5% для генераторов мощностью свыше 1 000 ква и больше чем на 10% для генераторов мощностью от 100 до 1 000 ква.

Принцип действия двигателей — электрических машин, предназначенных для преобразования электрической энергии в механическую, основан на законах движения проводника с током, помещенного в магнитное поле. Если проводник, по которому проходит электрический ток, поместить в магнитное поле с направлением магнитных силовых линий, не совпадающим с направлением тока в проводнике, то этот проводник будет выталкиваться из магнитного поля, причем сила выталки-

вания будет пропорциональна интенсивности магнитного поля, величине тока проходящего через проводник, и длине той части проводника, которая находится в магнитном поле. Эта сила определится так:

$$F = BIlC_F, \text{ кгс},$$

где I — ток, проходящий в проводнике, а;

C_F — коэффициент, учитывающий характер изменения магнитного поля по длине проводника, а также угол между направлением проводника и поля.

Требование синусоидального изменения электромагнитных величин предъявляется к промышленным двигателям переменного тока в той же мере, как и к генераторам.

Так, например, в асинхронных двигателях синусоидальное изменение вращающегося магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, обеспечивает спокойную работу машины, уменьшает потери и, следовательно, нагрев двигателя. Наоборот, значительное отклонение кривой поля от синусоиды может привести к непроизвольному торможению короткозамкнутого асинхронного двигателя при пуске и другим нежелательным явлениям. В дальнейшем при непосредственном рассмотрении различных типов обмоток статоров мы отметим факторы, влияющие на форму кривой поля, и укажем некоторые способы изменения этой кривой с целью приближения ее к синусоиде в случаях, которые могут иметь место в практике работы обмотчика.

В электрических машинах переменного тока между скоростью вращения, числом полюсов и частотой тока существует взаимосвязь:

$$pn = 60f,$$

где f — частота тока, $гц$;

p — число пар полюсов;

n — скорость вращения, $об/мин$.

При принятой в СССР частоте тока для промышленных целей — 50 гц приведенная выше зависимость может быть преобразована:

$$p = \frac{3000}{n} \text{ или } n = \frac{3000}{p}.$$

Как известно, скорость вращения синхронных генераторов или двигателей равна скорости вращения магнитного поля, остается постоянной при холостом ходе и любой нагрузке и может быть точно определена по формуле

$$n_c = \frac{3\,000}{p}, \text{ об/мин.}$$

Для асинхронных двигателей скорость вращения, определенная по приведенной выше формуле, называемой синхронной скоростью асинхронного двигателя. В действительности скорость вращения асинхронного двигателя отличается от n_c на величину «скольжения», причем величина скольжения несколько увеличивается в процессе перехода двигателя от работы на холостом ходу к номинальной нагрузке. Скольжение двигателя обычно определяется в процентах к синхронной скорости по формуле

$$s = \frac{n_c - n}{n_c} 100, \%$$

где n — действительная скорость вращения ротора асинхронного двигателя для данного режима нагрузки, об/мин.

Для асинхронных двигателей общепромышленного назначения скольжение при номинальной нагрузке обычно составляет 1—3%. Для двигателей специального назначения величина скольжения может достигать 10% и более.

Чтобы обеспечить требуемые параметры электрической машины — скорость вращения, номинальное напряжение, ток, к. п. д. и др., необходимо правильно выбрать сечение и количество проводников, закладываемых в пазы статора, и правильно их соединить между собой. Соединенные между собой проводники образуют обмотку статора, а чертеж, показывающий в условной форме, как надо производить это соединение, называется схемой обмотки.

При конструировании новых электрических машин, а также при их перемотке в процессе капитального ремонта с необходимостью сохранения или изменения параметров машины или ее условий эксплуатации задача составителя схем заключается в том, чтобы не только правильно соединить все элементы обмотки, но и вы-

брать из всех возможных типов и видов схем ту обмотку, которая для данного случая отвечала бы в большей мере всем поставленным требованиям с учетом и технологических возможностей предполагаемого изготовления обмотки.

Сформулируем общие требования (помимо упомянутого выше синусоидального изменения формы кривой поля и напряжения), которые предъявляются к схемам обмоток статоров машин переменного тока:

1. Фазные напряжения должны быть одинаковыми по величине и сдвинуты друг относительно друга на строго определенный угол, зависящий от числа фаз обмотки.

Для трехфазной системы этот угол должен быть равен 120 или 240° .

2. Активные и индуктивные сопротивления каждой из фаз должны быть одинаковыми, причем активные сопротивления (по возможности) — наименьшими для уменьшения тепловых потерь в меди обмотки.

3. Параллельные ветви в фазах обмотки, если таковые необходимы по расчету, должны быть идентичными.

4. Схема должна обеспечивать наиболее простое и экономичное технологическое решение заготовки элементов обмотки и ее монтажа в пазы статора.

5. Схема должна обеспечивать возможность качественного исполнения самой обмотки и ее крепления в статоре.

В некоторых отдельных случаях к схемам, а следовательно, и к самим обмоткам могут быть предъявлены дополнительные требования, исходящие из назначения и условий работы электрической машины.

Исходным элементом, из которого составляется схема обмотки, является катушка, состоящая из одного или нескольких последовательно соединенных витков. Витком называется элемент, состоящий из двух последовательно соединенных между собой проводников, расположенных под соседними разноименными полюсами. Проводники, образующие виток, могут быть подразделены на несколько параллельных проводов. К подразделению витка прибегают как из технологических соображений удобства намотки во избежание применения грубого провода большого сечения, так и из теоретических соображений, для уменьшения дополнительных потерь в меди обмотки, которые при переменном токе

существенно снижаются в пучке параллельных изолированных друг от друга проводников, нежели в одном сплошном проводе общего сечения.

На рис. 1 изображена катушка, состоящая из шести последовательно соединенных витков, причем каждый виток подразделен на два параллельных провода.

Части катушки, лежащие в пазах активной стали статора, называются пазовыми или активными

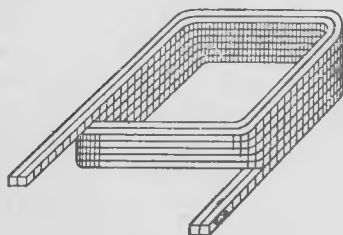


Рис. 1. Катушка из шести витков, намотанных двумя параллельными проводами.

частями катушки, так как они пронизываются магнитным потоком и непосредственно участвуют в создании э. д. с. машины. Проводники, лежащие вне пазовой части и служащие для соединения между собой активных частей катушки, называются лобовыми частями катушки.

Исполнение и форма пазовой и лобовой частей катушек зависят от типа обмотки и рассматриваются ниже в соответствующих разделах брошюры.

Катушка, помимо определенного числа витков, характеризуется также своим шагом, т. е. числом пазовых делений, заключенных между центрами пазов, в которые закладываются стороны катушки.

Шаг катушки (y) называют диаметральной, если он равен полюсному делению. В этом случае

$$y = \tau = \frac{z}{2p},$$

где z — число пазов статора;

$2p$ — число полюсов обмотки.

Полюсное деление представляет длину части окружности расточки статора, приходящейся на долю одного полюса, и может быть определено по формуле

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \text{ мм},$$

где D — диаметр расточки статора, мм.

Полюсное деление может быть также выражено в относительных единицах, т. е. числом пазовых делений,

заключенных между осями соседних полюсов, как это следует из формулы для диаметального шага обмотки.

В двухполюсной электрической машине центральный угол, соответствующий полюсному делению, составляет 180° , в четырехполюсной — 90° , в шестиполюсной — 60° и т. д.

При составлении схем обмоток и вообще в теории электрических машин принято при любом числе полюсов машины считать угол, соответствующий полюсному делению, равным 180 эл. град.

Тогда число электрических градусов в окружности статора электрической машины с любым числом полюсов будет равно $180 \cdot 2p$.

Шаг катушки может быть несколько меньше диаметального; в этом случае его называют укороченным.

Укорочение шага катушки (обмотки) характеризуется коэффициентом укорочения

$$\alpha = \frac{y_z}{\tau},$$

где y_z — укороченный шаг обмотки.

Для примера возьмем статор электрической машины, имеющий 60 пазов. Для образования четырехполюсной обмотки полюсное деление τ , а также диаметальный шаг y равны 15, т. е. если одна сторона катушки закладывается в паз статора, который условно обозначается № 1, то вторая сторона этой катушки должна быть заложена в паз № $(1 + 15) = 16$.

Если же вторую сторону катушки заложить в паз № 14, т. е. применить укороченный шаг, равный 13, то коэффициент укорочения шага будет:

$$\alpha = \frac{13}{15} = 0,87,$$

т. е. шаг составит 87% диаметального.

Несмотря на то, что укорочение шага влечет за собой уменьшение э. д. с., индуцируемой в катушке (так как обе стороны витка при укороченном шаге не могут одновременно находиться под центрами соседних полюсов), оно широко применяется в двухслойных обмотках электрических машин переменного тока.

Помимо экономии меди на длине лобовых частей, укорочение шага обмотки улучшает электрические свойства машины путем снижения действия так называемых

высших гармонических, которые неблагоприятно сказываются на форме поля э. д. с. и увеличивают дополнительные потери в меди обмотки.

Укорочение шага обмотки также облегчает укладку катушек в пазы статора.

В различных типах обмотки, исходя из условий электромагнитного расчета и технологических соображений, применяется укорочение шага обычно до 0,75, реже до 0,66, а в отдельных случаях и до 0,5.

Большие укорочения шага становятся невыгодными из-за существенного уменьшения индуктируемой э. д. с.

Характерным показателем каждой обмотки статора электрической машины переменного тока является q — число пазов на полюс и фазу. Это число показывает, сколько катушечных сторон каждой фазы приходится на один полюс обмотки. Поскольку катушечные стороны одной фазы, лежащие под двумя соседними полюсами обмотки, образуют катушечную группу, то число q показывает, из скольких катушек состоят катушечные группы данной обмотки.

Таким образом,

$$q = \frac{z}{2pt},$$

где t — число фаз обмотки.

Для рассматриваемых нами трехфазных обмоток

$$q = \frac{z}{6p}.$$

Для вышеприведенного примера, где

$$z = 60, \text{ а } 2p = 4,$$

$$q = \frac{z}{6p} = 5.$$

Если же статор этой машины использовать для изготовления восьмиполюсной машины, то

$$q = \frac{60}{6 \cdot 4} = 2,5,$$

т. е. число пазов на полюс и фазу будет дробным. Дробное q , так же как и целое, определяет количество катушек в каждой катушечной группе. Как это делается, мы увидим ниже при рассмотрении обмоток с дробным q .

Из условий симметрии обмотки следует, что все три ее фазы должны иметь одинаковое количество катушек, симметрично расположенных по окружности статора.

Именно в этом случае суммарные э. д. с. фаз обмотки будут равны по величине и сдвинуты между собой на 120 или 240° .

Катушки должны быть соединены в катушечные группы, а последние — в фазы так, чтобы обеспечить необходимое количество полюсов обмотки и правильное их чередование.

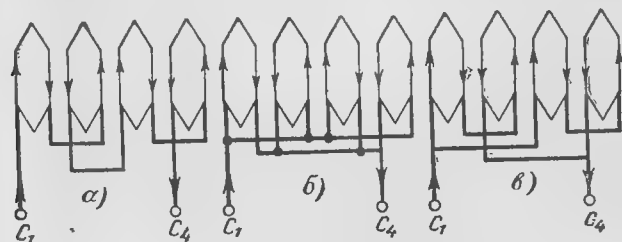


Рис. 2. Соединение катушечных групп.

а — последовательное; *б* — параллельное; *в* — смешанное.

Катушки внутри катушечной группы соединяются между собой всегда последовательно, а катушечные группы в фазе могут быть соединены последовательно, параллельно или смешанным способом (последовательно-параллельно). Все эти способы соединения катушечных групп показаны на рис. 2. Основным правилом при пересоединении последовательной обмотки в параллельную или смешанную является сохранение направления тока в катушечных группах таким же, как это имело бы место при последовательном соединении, в котором направление токов определяется чередованием полюсов обмотки.

Подробнее о параллельных соединениях в обмотках будет сказано ниже при непосредственном рассмотрении различных типов схем.

И, наконец, на схеме требуется указать способ соединения фаз обмотки — в звезду или в треугольник. Каким из этих способов должны быть соединены фазы, определяют расчетом обмотки.

Для одного и того же номинального напряжения, для различных машин могут применяться как один, так и

другой способ. Само соединение фаз может быть выполнено как внутри машины, глухо, так и при помощи перемычек на специальной щитке, вынесенном на корпус машины. Последний способ удобен тем, что позволяет более четко проводить профилактические испытания обмотки в процессе эксплуатации, так как начала и концы всех фаз могут быть свободно присоединены к испытательной аппаратуре.

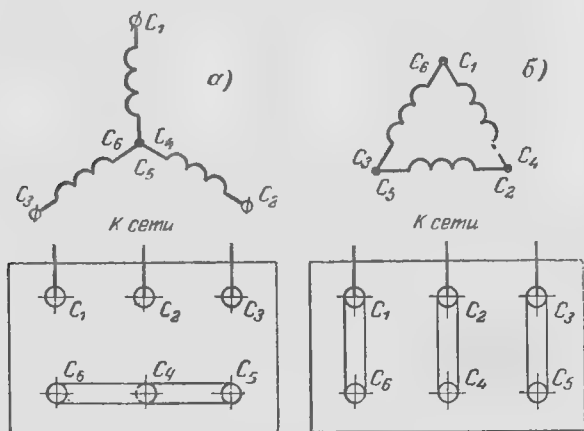


Рис. 3. Соединение фаз обмотки двигателя на 220/380 в.

а — в звезду на 380 в; б — в треугольник на 220 в.

Очень часто электрические машины бывают пригодны для работы на любом из двух номинальных напряжений, находящихся в соотношении 1 : 1,73, например 220 и 380 в, 127 и 220 в или реже 6000 и 10 500 в; тогда при меньшем из этих двух напряжений его фазы должны быть соединены в треугольник, а при большем — в звезду.

На рис. 3 показаны принципиальные схемы соединения фаз обмотки и соответствующие этим соединениям переключения, производимые на внешнем щитке для асинхронного двигателя на номинальные напряжения 220/380 в.

Обмотки статоров подразделяют на однослойные и двухслойные.

При однослойной обмотке каждая сторона катушки занимает весь паз; при двухслойной обмотке сторона

катушки занимает по высоте только половину паза, т. е. в каждый паз закладываются две стороны катушки, образуются два слоя обмотки.

Из сказанного следует, что при однослойной обмотке число катушек равно половинному числу пазов, а при двухслойной — полному числу пазов.

В современном электромашиностроении применяются как однослойные, так и двухслойные обмотки, и каждому из этих видов присущи свои достоинства и недостатки. Так, например, однослойные обмотки применяются в двигателях единой серии А и АО до 5-го габарита включительно. В этих обмотках в противоположность двухслойным отсутствует изоляционная прокладка в середине паза и тем самым повышается коэффициент заполнения паза. При однослойных обмотках для мелких машин с мягкими всыпными катушками, закладываемыми в пазы одновременно обеими сторонами, имеются большие возможности к применению полуавтоматических и автоматических станков для укладки обмотки. Ниже, в разделе однослойных обмоток, приводятся некоторые положительные свойства однослойных обмоток и для крупных машин высокого напряжения.

Основными недостатками однослойных обмоток по сравнению с двухслойными являются:

увеличенный (доходящий до 20%) расход меди;
невозможность построения обмотки с укороченным шагом и ограниченные возможности построения схем с дробным q для наиболее распространенного вида однослойных обмоток — концентрических;

более громоздкая и трудоемкая технология изготовления катушек для крупных машин высокого напряжения и их монтажа в машине.

Перечисленные недостатки однослойных обмоток весьма существенны и сильно ограничивают их применение, в особенности для крупных машин высокого напряжения. Более частные выводы о достоинствах и недостатках различных типов обмоток можно будет сделать после непосредственного ознакомления со схемами обмоток, приведенными в соответствующих разделах брошюры.

Перед тем как перейти непосредственно к рассмотрению схем обмоток, следует обусловить некоторые буквенные обозначения и приемы изображения схем на чертежах.

Основной чертеж схемы в условном виде представляет собой развертку окружности статора на плоскости. Пазаы и стороны уложенных в них катушек изображаются прямыми линиями. Схемы двухслойных обмоток в пазовой части изображаются двумя рядом расположенными линиями — сплошной и пунктирной, причем сплошная линия обозначает сторону катушки, уложенную в верхнюю часть паза, а пунктирная линия — нижнюю сторону катушки, уложенную на дно паза. Нижний и верхний слой лобовых частей изображаются соответственно пунктирными и сплошными линиями.

Кроме основного, приводятся и другие способы изображения схем (кольцевой, торцевой, упрощенной), пояснения к которым даны в ходе описания этих схем.

Стрелки на элементах обмотки, проставленные на некоторых схемах, показывают направление э. д. с. или токов в соответствующих элементах обмотки в определенный (один и тот же для всех фаз обмотки) момент времени.

Начала и концы фаз по действующему ГОСТ 183-55 обозначаются:

начало	1-й фазы	—	C_1
"	2-й "	—	C_2
"	3-й "	—	C_3
конец	1-й "	—	C_4
"	2-й "	—	C_5
"	3-й "	—	C_6

В литературе более ранних годов издания, а также на паспортных табличках электрических машин старых выпусков обозначение выводов дается соответственно: X, Y, Z, U, V, W или $H_1, H_2, H_3, K_1, K_2, K_3$.

Для составления схем трехфазных обмоток статоров электрических машин переменного тока, помимо указания вида обмотки, должны быть даны определяющие ее параметры:

z — число пазов; $2p$ — число полюсов; y_z — шаг обмотки по пазам; a — число параллельных ветвей в фазе; Λ — (звезда) или Δ (треугольник) — способ соединения фаз.



1. РАЗВЕРНУТЫЕ СХЕМЫ ОДНОСЛОЙНЫХ ОБМОТОК

Однослойные обмотки статоров в современных отечественных машинах применяются, как об этом уже говорилось выше, в основном для двигателей небольшой мощности в виде выпуклых катушек из круглого провода. Но схемы однослойных обмоток представляют интерес для обмотчиков и мастеров, главным образом потому, что до настоящего времени в промышленности находятся в эксплуатации большое число двигателей старых выпусков отечественного производства и иностранных фирм, имеющих однослойную обмотку, и почти все требующие полной замены обмотки в связи со старением изоляции от длительного срока работы.

Хотя данная брошюра не рассматривает вопрос технологии производства обмоток, но ввиду того, что технологические особенности определенным образом влияют на построение некоторых схем однослойных обмоток, здесь следует очень коротко отметить различные технологические принципы исполнения таких обмоток.

Однослойные обмотки крупных двигателей выполнялись фирмами, как правило, путем протяжки провода (чаще всего литцы или круглого сечения) через вставленные в закрытые или полужакрытые пазы микафолиевые гильзы, т. е. катушка, а иногда и целая катушечная группа, была изготовлена одним сплошным проводом, без паяных соединений.

При капитальных ремонтах обмоток такого типа в настоящее время упомянутый способ «протяжки» почти не применяется.

Сейчас катушки однослойной концентрической обмотки изготовляют в виде так называемых «разрезных» U-образных заготовок, вставляемых с торца в пазы, а на противоположной стороне производят формовку лобовой части и пайку каждого витка в отдельности.

И только немногие иностранные фирмы (в частности, ЧКД — Чехословакия) изготовляют в настоящее время однослойные обмотки, выполненные в виде полностью отформованных замкнутых катушек, укладываемых через шлицы открытых пазов.

Способ «разрезных» U-образных заготовок, несмотря на наличие большого количества паяных соединений, предпочтительнее способа «протяжки» по следующим основным положениям:

обеспечивается более надежная витковая изоляция; обеспечивается более эффективное заполнение паза медью;

имеется возможность заблаговременной заготовки обмотки с целью выполнения замены устаревшей обмотки в минимальные сроки.

Переходя непосредственно к построению схем однослойных обмоток, мы разделим их на два основных типа: concentрические и шаблонные.

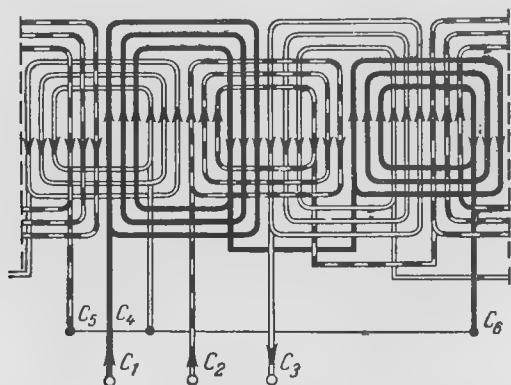


Рис. 4. Схема двухплоскостной concentрической обмотки.
 $2p=4$; $z=36$.

Concentрические обмотки. На рис. 4 представлена трехфазная схема однослойной concentрической обмотки статора для четырехполюсной машины; число пазов $z=36$; число пазов на полюс и фазу $q = \frac{z}{2p} = \frac{36}{6 \cdot 2} = 3$.

Такая обмотка называется concentрической потому, что катушечная группа (в данном случае образованная из трех катушек) состоит из concentрически расположенных катушек. По способу расположения лобовых частей изображенную на рис. 4 обмотку называют двухплоскостной (двухъярусной), так как лобовые части катушек расположены в 1-й и 2-й плоскостях.

Различные виды взаиморасположения плоскостей такой обмотки показаны на рис. 5.

Для того чтобы яснее представить принцип образования фазы обмотки и соединения фаз, на рис. 4 на линии пазов расставлены стрелки, которые указывают на-

правление токов в каждом пазу в зависимости от расположения его под северным или южным полюсом в магнитном поле обмотки в какой-то определенный момент времени. В соответствии с этим проставлены направления токов на входе фаз обмотки.

Таким образом, в любой момент времени направление тока в начале одной из фаз трехфазной обмотки всегда будет противоположно направлению токов в началах двух других фаз, как это и следует из векторной диаграммы фазовых токов трехфазной системы. Этим правилом необходимо пользоваться для проверки пра-



Рис. 5. Расположение лобовых частей двухплоскостной концентрической обмотки.

вильности выбора начал и концов фаз при составлении схемы обмотки.

Далее, следует оговорить, что поскольку однослойные обмотки с дробным числом q применяются чрезвычайно редко, то все сказанное здесь и ниже, касающееся однослойных обмоток, будет относиться к обмоткам только с целым числом q . Обмотки с дробным числом q будут рассмотрены в разделе двухслойных обмоток.

В однослойной обмотке число катушечных групп в фазе равно числу пар полюсов p ; следовательно, число катушечных групп всей обмотки будет $3p$, т. е. $3p/2$ малых (1-й плоскости) катушечных групп и $3p/2$ больших (2-й плоскости) катушечных групп. Число $3p/2$ может быть целым тогда, когда p четное, т. е. число полюсов обмотки $2p$ равно 4, 8, 12, 16 и т. д. Это значит, что только при числе полюсов машины из указанного ряда вся двухплоскостная обмотка может быть распределена на три фазы с равным числом больших и малых катушечных групп в каждой фазе, как это имело место в обмотке, приведенной на рис. 4, или в обмотке, приведенной на рис. 6 для восьмиполюсной машины.

В том же случае, когда число пар полюсов машины нечетное (число полюсов $2p$ равно 6, 10, 14, 18 и т. д.), двухплоскостная обмотка не может быть распределена по фазам с одинаковым количеством больших и малых

катушечных групп. Она должна иметь так называемую «переходную» катушечную группу, как бы наполовину находящуюся в первой плоскости, наполовину — во второй. Схема такой обмотки для шестиполусной машины приведена на рис. 7.

Переходные катушки изготавливаются из заранее вставленных стержней и формируются в лобовых частях

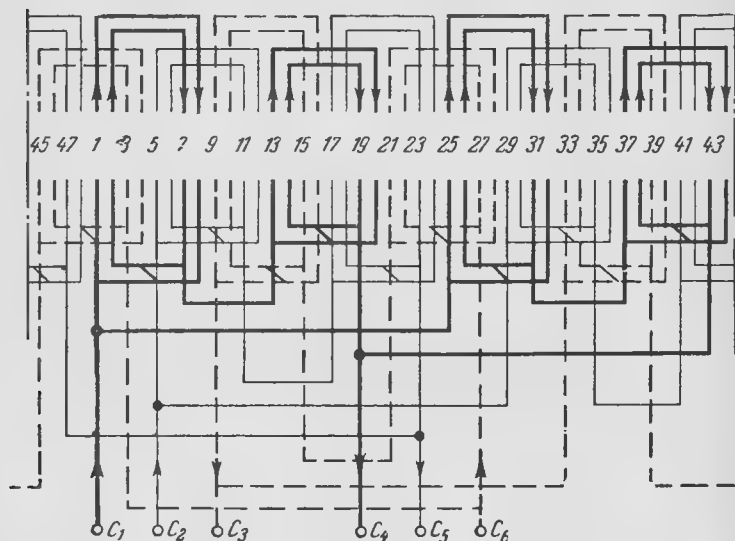


Рис. 6. Схема двухплоскостной концентрической обмотки.

$$2p=8; z=48; a=2.$$

с обеих сторон статора и имеют довольно сложную конфигурацию лобовых частей.

Если мы еще раз обратимся к рис. 4 и 6, то увидим, что обмотка рис. 4 имеет последовательное соединение катушечных групп в фазе, а обмотка рис. 6 — соединение в две параллельные ветви. Исходя из общего принципа образования параллельных ветвей, последние должны иметь одинаковые индуктивные и активные сопротивления для обеспечения равенства проходящих по ним токов. Следовательно, обмотка, изображенная на рис. 4, при соединении в две параллельные ветви имела бы неодинаковые активные сопротивления, так как в одну параллельную ветвь входила бы малая катушечная группа, а в другую — большая с разными длинами

лобовых частей и, следовательно, разными активными сопротивлениями. Что касается схемы, изображенной на рис. 6, то здесь в каждую параллельную ветвь входит по одной малой и одной большой катушечной группе и принцип одинаковости активных сопротивлений соблюден. Если же мы захотели бы эту обмотку соединить в четыре параллельные ветви, то этот принцип снова пришлось бы нарушить и получить обмотку с разными активными сопротивлениями в параллельных ветвях.

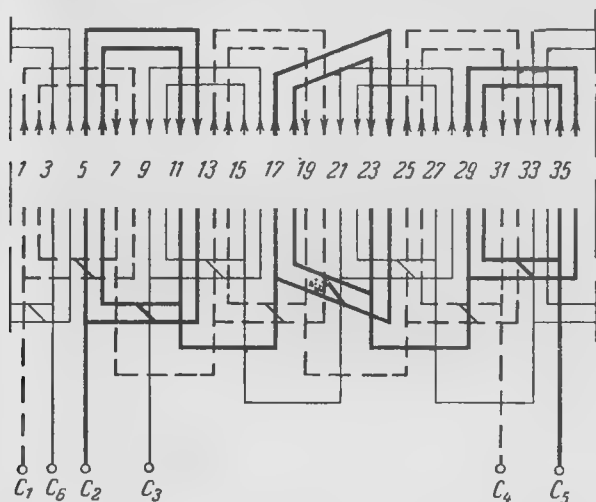


Рис. 7. Схема обмотки с переходной катушечной группой.

$2p=6$; $z=36$.

Здесь же следует сразу заметить, что в машинах переменного тока активное сопротивление фазы обмотки составляет обычно не более 10—12% полного сопротивления, которое в основном зависит от индуктивного сопротивления. И если учесть, что за счет различной длины прямолинейных вылетов большой и малой катушечных групп разница в их активных сопротивлениях будет также порядка 10—12%, то разница в полных сопротивлениях параллельных ветвей (при условии равенства их индуктивных сопротивлений) и, следовательно, токов в них составит около 1%, что практически не может повлиять на работу машины. Это положение служит объяснением применения для двухполюсных ма-

шин трехплоскостных обмоток с различными длинами катушечных групп в фазах и соответственно различными сопротивлениями фаз обмотки (см. рис. 9).

На рис. 8 изображена схема обмотки для четырехполюсной машины точно такой же, для которой была ранее представлена схема, изображенная на рис. 4.

Различие этих схем состоит лишь в том, что обмотка рис. 8 состоит из одинаковых катушечных групп

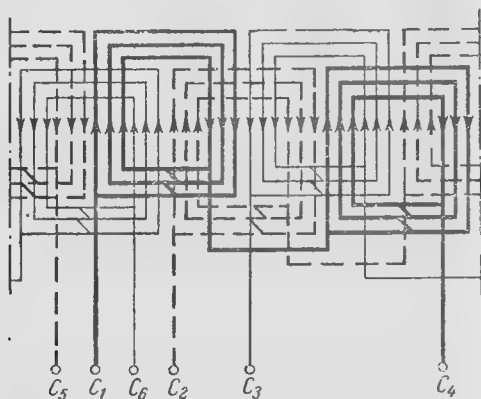


Рис. 8. Схема двухплоскостной концентрической равнокатушечной обмотки.

$$2p=4; z=36.$$

(отсюда ее название — «равнокатушечная»). При соединении этой обмотки в две параллельные ветви разницы в активном сопротивлении параллельных ветвей не будет. Но, учитывая сказанное выше о степени влияния неравенства активных сопротивлений в параллельных ветвях на работу машины, основной причиной применения равнокатушечных обмоток является не стремление достигнуть равенства активных сопротивлений в параллельных ветвях, а упрощение технологии изготовления U-образных заготовок, так как при этом все катушечные группы будут одинаковыми. Если в обыкновенной однослойной обмотке число видов катушек будет равно $2q$, то в равнокатушечной обмотке это число будет только q .

Укладка (вставка) равнокатушечной обмотки производится с обоих торцов статора, причем отформованная лобовая часть U-образной заготовки с обеих сторон разместится в первой плоскости. Лобовые части второй

плоскости формируются после укладки всех катушек в пазы статора.

На рис. 9 представлена очень часто применяемая на практике для двухполюсных машин схема трехплоскостной обмотки (лобовые части обмотки располагаются в трех плоскостях). Как это видно из рисунка, лобовые части первой фазы обмотки располагаются только в 1-й

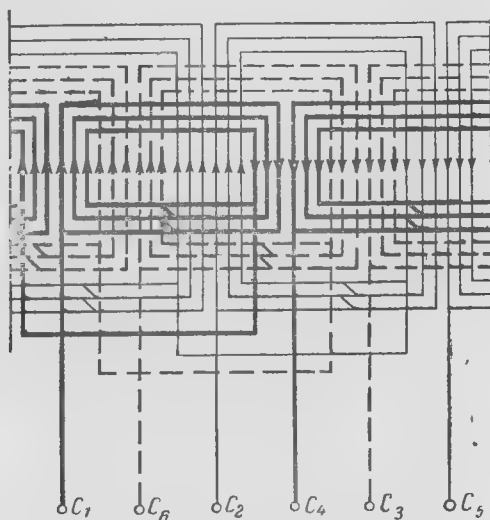


Рис. 9. Схема трехплоскостной concentric обмотки «вразвалку».

$$2p=2; z=36.$$

плоскости, второй фазы — только во 2-й плоскости и третьей фазы — только в 3-й плоскости.

Таким образом, как об этом уже выше упоминалось, активные сопротивления фаз в этой обмотке различны. Другой особенностью этой схемы является то, что катушечная группа, состоящая из шести катушек ($q=6$), разбита на две concentric подгруппы по три катушки в каждой, т. е. катушечная группа как бы развалена надвое. Отсюда такую обмотку часто называют намотанной «вразвалку».

Способ намотки «вразвалку» часто применяют и для машин с большим числом полюсов, когда число пазов на полюс и фазу q равно шести или восьми и реже —

при q , равном четырем. Обмотка со сравнительно большим числом q , спроектированная «вразвалку», дает возможность уменьшить радиальные размеры корпуса электрической машины за счет небольшого увеличения ее аксиальных размеров, что в общем-то приводит к довольно ощутимому снижению общего веса машины.

Кроме того, разбивка многокатушечных групп на полугруппы обеспечивает более простое и надежное механическое крепление лобовых частей обмотки.

Трехплоскостную обмотку, изображенную на рис. 9, также можно преобразовать в «равнокатушечную»; при этом катушечные группы 2-й плоскости (второй фазы) останутся без изменений, лобовые части катушечных групп первой фазы (большая катушечная группа, рис. 9) с задней стороны перейдут в 1-ю плоскость, а лобовые части катушечных групп третьей фазы (малая катушечная группа, рис. 9) соответственно переместятся в 3-ю плоскость.

При выборе схемы для трехплоскостной обмотки «вразвалку» следует руководствоваться следующими соображениями: обмотка по схеме с катушечными группами разной длины (по типу, изображенному на рис. 9) требует заготовки трех длин U-образных катушечных групп, причем большая катушечная группа иногда должна иметь миканитовые толстостенные гильзы очень большой длины, что часто вызывает затруднения при изготовлении соответствующих прессформ для выпечки гильз; зато монтаж катушечных групп в статоре, формовка второй лобовой части в такой обмотке проще, чем у «равнокатушечной».

Обмотка по «равнокатушечной» схеме более проста в подготовительной части (все U-образные катушечные группы одинаковы), но зато более сложна в монтаже и формовке второй лобовой части, так как вставка всех катушечных групп при этом производится одновременно с обоих торцов статора и выступающие длинные конца разрезанных лобовых частей не дают возможности «кантовки» статора и установки его в удобное для монтажа лобовых частей положение.

Последние соображения еще раз напоминают о том, что при составлении схемы для той или иной машины всегда следует принимать во внимание технологические возможности исполнения этой обмотки в определенных условиях.

Рассмотрим ещё одно очень важное качество трехплоскостной обмотки, обеспечивающее удобство эксплуатации двигателя.

В настоящее время на промышленных предприятиях находится в эксплуатации большое количество крупных двигателей с разъемным статором, состоящим из двух половин — нижней и верхней. Эти двигатели, как правило, являются тихоходными (т. е. с диапазоном от 375 об/мин и ниже) и очень часто по условиям эксплуатации, в особенности в металлургической и химической промышленности, требуют регулярных (1—2 раза в год) ревизий с выемкой ротора и осмотром состояния всех частей двигателя. Общие веса таких двигателей иногда доходят до 40—50 т. Естественно, такелажные работы были бы значительно облегчены при разборке и сборке по частям: сначала съём верхней половины статора, затем выемка ротора; а нижнюю половину статора в этом случае вынимать нет необходимости. Мало того, в некоторых цехах подъемные устройства вообще не рассчитаны на общий вес двигателя, т. е. предусмотрен монтаж только по частям. Здесь большую роль играет тип обмотки статора. При двухслойной обмотке разъем половин статора вообще очень затруднен, а иногда и просто невозможен, так как при этом приходится сильно повреждать обмотку.

На рис. 10 приведена часть схемы однослойной обмотки статора двигателя переменного тока на 125 об/мин, имеющего разъемный статор. Схема представлена в двух вариантах: в двухплоскостном и трехплоскостном исполнениях. Как видно из рисунка, при разъединении половин статора по линиям разъема в двухплоскостном варианте приходится демонтировать по одной катушечной группе обмотки в каждом разъеме.

При трехплоскостной схеме лобовые части катушек в линию разъема не попадают; необходимо только разъединить межгрупповые перемычки. Таким образом, в случаях, когда в эксплуатации машины с разъемным статором необходимы частые осмотры с разборкой двигателя, однослойная концентрическая обмотка, выполненная по трехплоскостной схеме имеет неоценимое преимущество перед всеми другими видами обмоток.

Рассмотрев различные типы однослойных концентрических обмоток, сформулируем основные положения, ко-

торыми следует руководствоваться при составлении схемы обмотки:

1) исходя из технологических условий заготовки и укладки катушек, а также условий эксплуатации машины, выбирают тип обмотки (двух- или трехплоскостная, разно- или равнокатушечная);

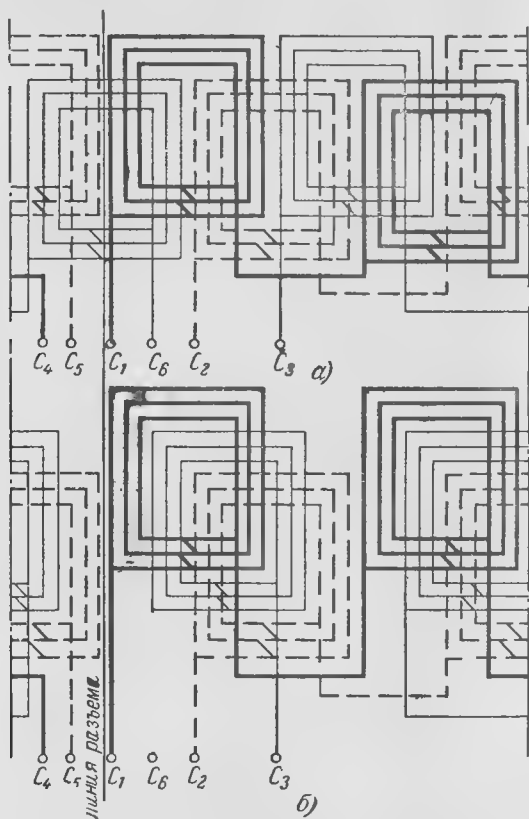


Рис. 10. Преобразование двухплоскостной обмотки (а) в трехплоскостную (б) в разъемных статорах.

2) определяют число катушек в катушечной группе, равное числу q ;

3) определяют шаг катушек по пазам.

Шаг большой (внешней) катушки в катушечной группе равен $4q - 1$.

Например, в обмотке с $q=4$ шаг внешней катушки равен 15, или, как принято обозначать, шаг 1—16. Шаг каждой следующей внутренней катушки уменьшается на два пазовые деления, т. е. составит 1—14, 1—12 и 1—10;

4) определяют, возможно ли соединить проектируемую обмотку в требуемое число a параллельных ветвей. Для осуществления этого требования необходимо, чтобы частное p/a было целым числом;

5) расставляют направления токов под полюсами, образованными магнитным полем обмотки, соединяя при помощи междукатушечных соединений отдельные катушки в катушечные группы и при помощи междугрупповых соединений — катушечные группы в фазы; при этом выбранное направление тока в фазе должно соответствовать стрелкам во всех катушках фазы;

6) выбирают катушки, из которых должны выходить начала и концы фаз обмотки.

Как уже сказано в общих сведениях настоящей брошюры, суммы векторов последовательно соединенных катушек каждой фазы образуют так называемую симметричную звезду фазовых э. д. с., причем в какой последовательности складывать эти векторы, т. е. соединять отдельные катушки фаз, — безразлично. Другими словами, начало фазы обмотки можно брать из любой катушки этой фазы. Практически бывает удобно начала всех трех фаз выбирать в близко расположенных друг к другу катушечных группах с таким расчетом, чтобы выводные концы статорной обмотки были по возможности короче.

Для проверки правильности определения начал и концов фаз следует также воспользоваться правилом о направлении токов в фазах, о котором выше уже упоминалось.

Шаблонные обмотки можно разбить на следующие типы:

- 1) простую шаблонную обмотку;
- 2) шаблонную обмотку «вразвалку»;
- 3) цепную обмотку.

На рис. 11 приведена полная развернутая схема простой шаблонной обмотки двухполюсной машины при $q=3$. Из этой схемы видно, что катушки шаблонной обмотки (это относится ко всем типам шаблонных обмоток) имеют трапецеидальную форму. Одна прямолинейная часть катушки — длинная, другая — короткая.

Лобовые части катушек при этом располагаются в двух плоскостях.

Как видно из схемы, образование катушечных групп и фаз обмотки, определение начал и концов фаз производится так же, как и в концентрической обмотке.

Положительным качеством этой обмотки является то, что все катушки совершенно одинаковы по форме. Но все же технологически выполнение шаблонной об-

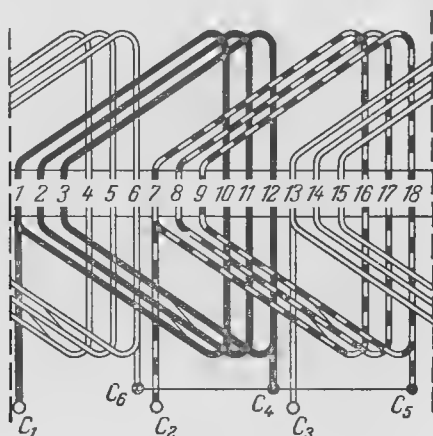


Рис. 11. Схема простой шаблонной обмотки.
 $2p=2$; $z=18$; $y_z=11$.

мотки довольно сложно, что и является ограничивающим фактором ее применения.

Шаблонная обмотка, так же как и концентрическая, может быть выполнена способом «вразвалку». На рис. 12 изображена полная схема шаблонной обмотки «вразвалку» для двухполюсной машины с $z=24$.

Одним из основных преимуществ схемы «вразвалку» является возможность образования в обмотке числа параллельных ветвей, равного числу полюсов машины. Это положение относится также и к концентрической однослойной обмотке, в то время как простые шаблонные или концентрические схемы позволяют выполнять максимальное число параллельных ветвей, равное числу катушечных групп в фазе или равное числу пар полюсов.

Дальнейшим развитием схемы, изображенной на рис. 12, может служить схема рис. 13 для точно такой же машины.

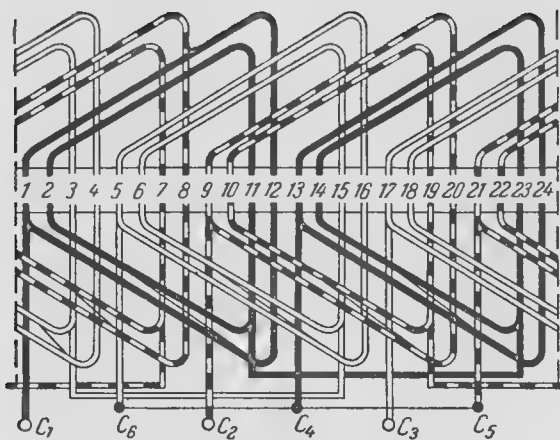


Рис 12 Схема шаблонной обмотки
«вразвалку».

$$2p=2; z=24; q=4; y_{z_1}=11; y_{z_2}=9.$$

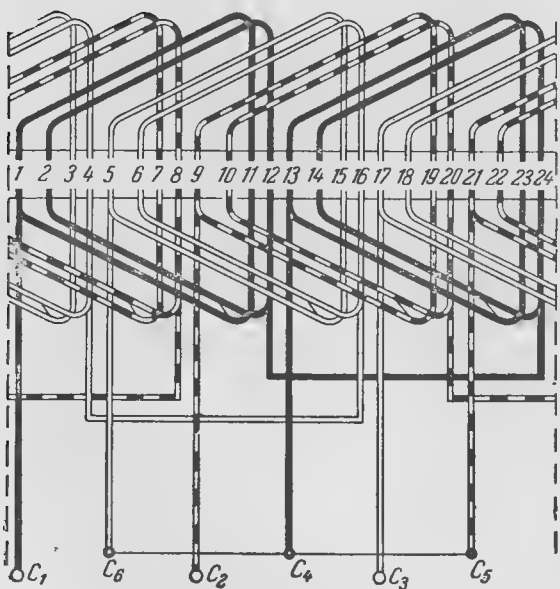


Рис. 13. Схема шаблонной равнокатушечной об-
мотки «вразвалку».

$$2p=2; z=24; q=4; y_z=10.$$

Если в схеме рис. 12 катушки имеют все-таки неодинаковую форму, то в схеме рис. 13 все катушки совершенно одинаковы. Схему рис. 13 можно рассматривать так же, как промежуточную между шаблонной обмоткой «вразвалку» и так называемой цепной обмоткой. Цепные обмотки также выполняют «вразвалку».

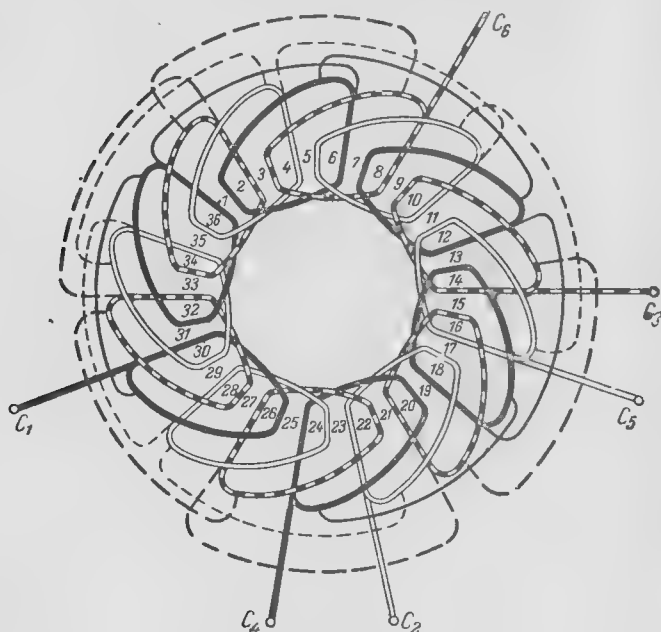


Рис. 14. Схема цепной обмотки.
 $2p=6$; $z=36$; $q=2$; $y_z=5$.

Отличие же их от предыдущих обмоток заключается в том, что в них короткие и длинные стороны катушек чередуются, т. е. «развалка» производится не по группам, а по катушкам.

На рис. 14 и 15 представлены схемы цепных обмоток соответственно для шести- и четырехполюсной машины. Рассматривая эти схемы, мы можем заметить, что если короткие стороны катушек лежат в нечетных пазах, то длинные стороны лежат в четных. Но так как каждая катушка состоит из короткой и длинной сторон, то катушку, а следовательно, и цепную обмотку можно обра-

зовать только в том случае, если ее шаг будет равен нечетному числу.

Относительно обмоток, изображенных на рис. 14 и 15, важно также отметить, что они выполнены с укороченным шагом катушек по пазам. На той и другой схеме

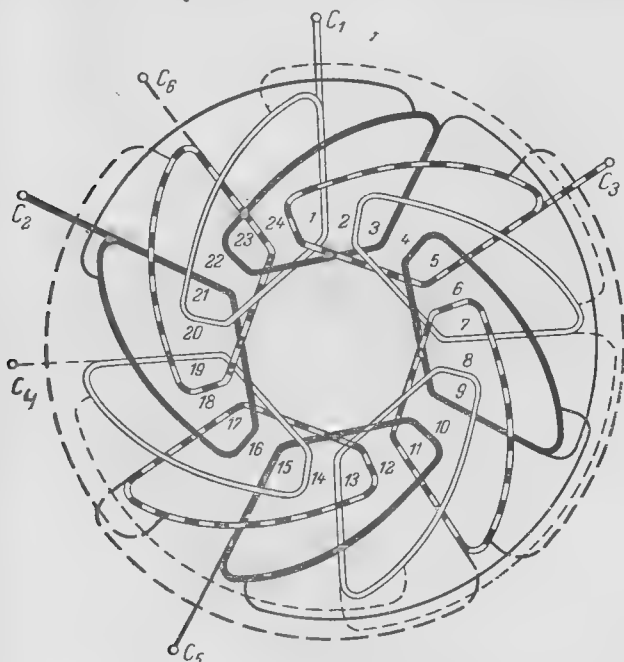


Рис. 15. Схема цепной обмотки.

$$2p=4; z=24; q=2; y_z=5.$$

этот шаг равен пяти, в то время как диаметральный шаг этих обмоток равен для рис. 14

$$\frac{z}{2p} = \frac{36}{6} = 6$$

и для рис. 15

$$\frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6.$$

Таким образом, цепная обмотка может быть выполнена с укороченным шагом, что дает экономию меди в лобовых частях.

Существуют и другие приемы построения схем шаблонных и цепных обмоток, например схемы с нечетным q , схемы с несплошными фазными зонами и др. Но мы ограничимся сказанным, так как шаблонные и цепные обмотки в настоящее время электромашиностроительными заводами почти не применяются, а могут встречаться только в ремонтной практике на отдельных типах машин иностранных фирм.



2. РАЗВЕРНУТЫЕ СХЕМЫ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК

Обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу. Наибольшее распространение в статорах электрических машин переменного тока во всем диапазоне мощностей имеют двухслойные петлевые обмотки.

Все катушки двухслойной обмотки одинаковы (рис. 16), что упрощает и удешевляет их изготовление.

Название «двухслойной», как уже об этом упоминалось, обмотка получила потому, что в паз закладываются стороны двух катушек, а каждая катушка располагается на статоре в двух слоях. Один слой обмотки укладывается на дно паза («нижний» слой), а другой — в части паза, прилегающей к расточке статора («верхний» слой). Лобовые части катушки также занимают два слоя, а переход из одного слоя в другой осуществляется в головках катушек.

Крепление лобовых частей двухслойной обмотки осуществляется сравнительно простым, но вместе с тем надежным способом, обеспечивающим высокую динамическую устойчивость.

Лобовые части двухслойной обмотки хорошо доступны для осмотра при профилактическом ремонте машины в эксплуатации, для очистки обмотки от загрязнений и продувке сжатым воздухом.

Общий вид статора с уложенной в его пазы двухслойной обмоткой представлен на рис. 17.

Мы будем рассматривать петлевые двухслойные обмотки в отличие от волновых, применяемых главным образом для фазных роторов асинхронных двигателей, а также, довольно часто, для статоров крупных гидро- и турбогенераторов.

Схемы волновых обмоток машин переменного тока — это специальный вопрос, который может быть предметом отдельного рассмотрения.

По своим электрическим и технологическим признакам двухслойные петлевые обмотки имеют, помимо уже перечисленных выше, еще и другие преимущества а именно:

а) практическая возможность применения катушек с любым укорочением шага, причем шаг катушки может быть как четным, так и нечетным;

б) сравнительно несложное выполнение обмотки с чис-

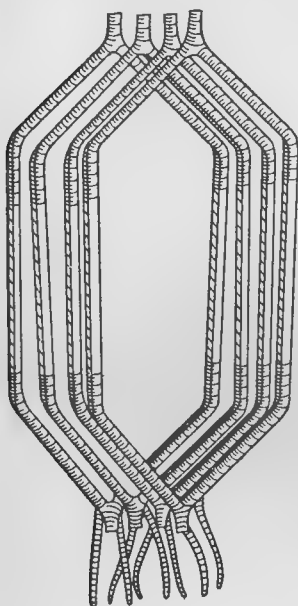


Рис. 16. Катушки двухслойной обмотки.

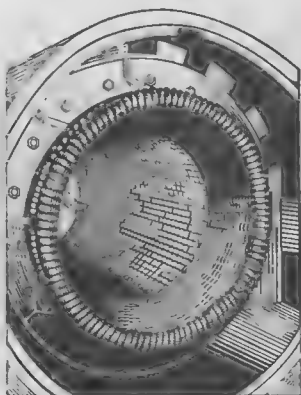


Рис. 17. Статор с уложенной обмоткой.

лом пазов на полюс и фазу (q) любой дробности; пп. «а» и «б» дают возможность влиять на форму кривой магнитного поля, приближая ее к синусоидальной;

в) возможность обеспечения практически допустимой асимметрии в принципиально несимметричных схемах;

г) возможность применения разноразмерных катушек при полном использовании площади пазов статора, если в результате электромагнитного расчета машины окажется, что полное число активных проводников в пазу должно быть нечетным.

Перечисленные качества двухслойной петлевой об-

мотки и обеспечивают преимущественное применение ее для статоров электрических машин переменного тока.

Для составления схем двухслойных обмоток будем пользоваться принятыми нами ранее условными графическими и буквенными обозначениями.

В качестве примера составим схему двухслойной обмотки со следующими параметрами (рис. 18):

$$2p=8; z=48; y_z=5; a=1.$$

Так как диаметральный шаг этой обмотки

$$y = \frac{z}{2p} = \frac{48}{8} = 6,$$

то укорочение обмотки

$$\alpha = \frac{y_z}{y} = \frac{5}{6}.$$

Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{48}{8 \cdot 3} = 2.$$

В соответствии с этим 1-я катушечная группа, состоящая из двух катушек, закладывается: верхними сторонами катушек в пазы, условно обозначенные 1 и 2, нижними сторонами в пазы 6 и 7.

Началом (C_1) первой фазы принимается вывод катушки из верха первого паза.

Верх пазов 3, 4, 5 и 6 и низ пазов 8, 9, 10 и 11 займут соответственно катушечные группы других двух фаз.

Таким образом, следующая катушечная группа первой фазы займет своими верхними сторонами пазы 7 и 8, а нижними — пазы 12 и 13.

Остальные катушечные группы первой фазы займут: верхними сторонами катушек — пазы 13 и 14, 19 и 20, 25 и 26, 31 и 32, 37 и 38, 43 и 44; нижними сторонами катушек — пазы 18 и 19, 24 и 25, 30 и 31, 36 и 37, 42 и 43, 48 и 1.

Для правильного образования и чередования полюсов катушечные группы при последовательном соединении (в нашем случае $a=1$ — соединение последовательное) должны соединяться между собой одноименными выводами. При соединении таким способом всех катушечных групп первой фазы получится свободный вывод из верха катушки, заложенной в 43-й паз. Этот вывод и является выводным концом первой фазы (C_4).

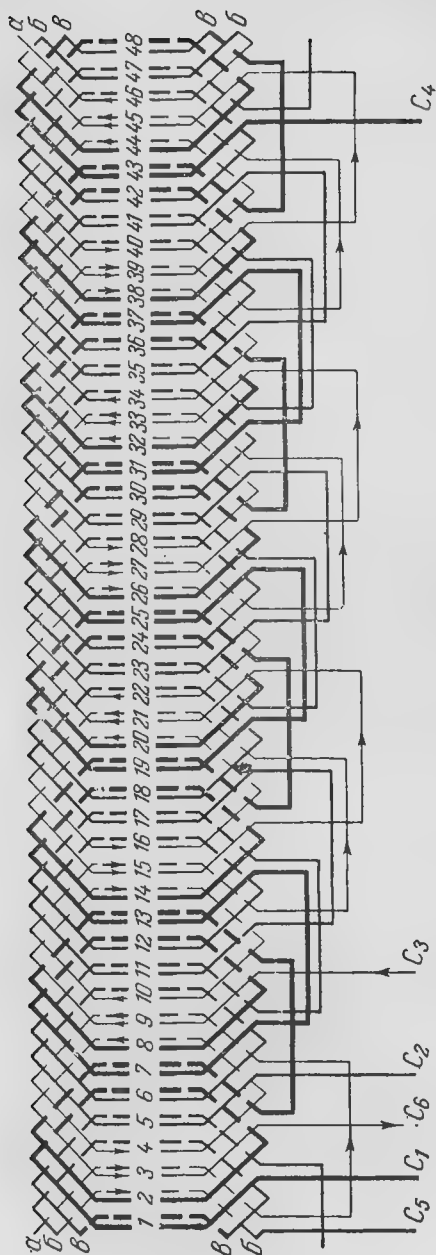


Рис. 18. Схема двухфазной обмотки.
 $2p=8$; $z=48$; $y_z=5$; $a=1$.

Начало второй фазы должно быть сдвинуто от начала первой фазы (если q — целое число) на 120 эл. град или на $2/3$ полюсного деления.

Так как полюсное деление

$$\tau = \frac{z}{2p} = \frac{48}{8} = 6,$$

то начало второй фазы должно быть сдвинуто на $2/3 \cdot 6 = 4$ паза, т. е. расположено в $1+4=5$ -м пазу

Аналогично этому начало третьей фазы располагается в 9-м пазу.

Концы второй и третьей фазы, также сдвинутые от конца первой фазы на $2/3 \tau$, должны находиться соответственно в 47 и 3-м пазах.

Обращает на себя внимание, что в одном пазу каждого полюса (пазы 6, 12, 18 и т. д.) имеет место встречное направление токов в верхней и нижней сторонах катушек.

Это является следствием принятого укорочения шага обмотки на один паз. (Принят шаг, равный пяти, по сравнению с диаметральной шагом, равным шести.)

При укорочении на два паза по отношению к диаметральному встречное направление токов будет уже в двух пазах каждого полюса. В этом легко убедиться, если самим попробовать составить схему, отличающуюся от приведенной на рис. 18 только шагом обмотки (1—5 вместо 1—6), и обозначить стрелками направления токов во всех элементах обмотки.

При диаметральной шаге обмотки встречных направлений токов в одном и том же пазу не будет.

Мы уже упоминали о том, что в зависимости от расчетных данных катушечные группы в фазе могут быть соединены между собой последовательно или параллельно (в две или несколько параллельных ветвей).

На рис. 19 приведена схема обмотки с параметрами, аналогичными обмотке рис. 18, но при соединении катушечных групп в две параллельные ветви ($a=2$).

В электрических машинах переменного тока различают два способа образования параллельных ветвей в обмотке статора — распределенный и сосредоточенный. Так, например, способ соединения параллельных ветвей, осуществленный в схеме рис. 19, называют сосредоточенным, так как все катушечные группы, входящие в какую-либо параллельную ветвь, сосредото-

№ катушечных групп I фазы

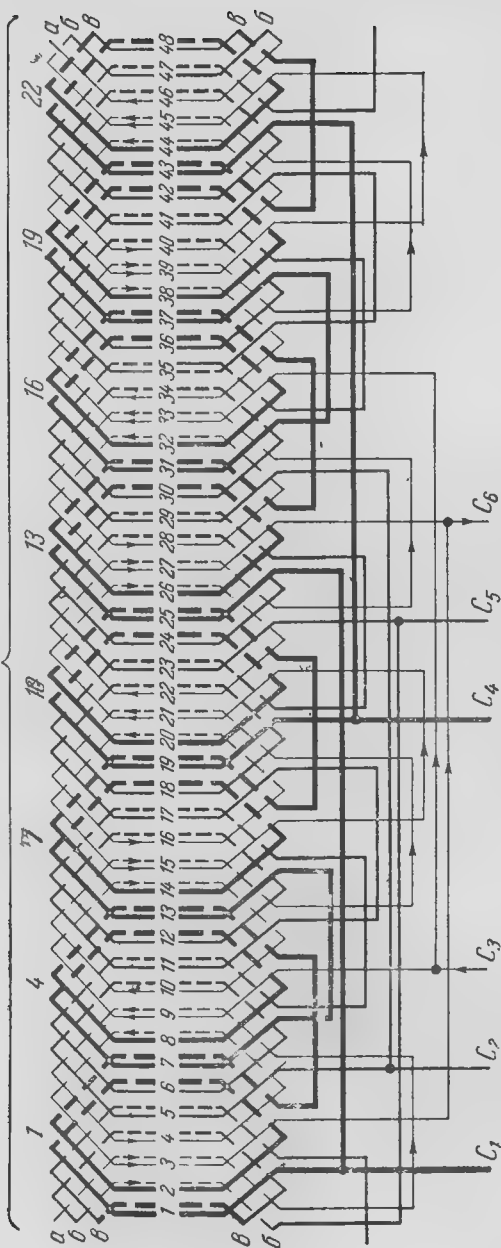


Рис. 19. Схема двухфазной обмотки.
 $2p=6$; $z=48$; $y_2=5$; $a=2$.

чены на определенной части окружности статора (в данном случае на половине статора).

Для того чтобы параллельное соединение в схеме рис. 19 сделать распределенным, надо в первую параллельную ветвь первой фазы последовательно включить катушечные группы 1, 7, 13 и 19 (за первую принимается катушечная группа, состоящая из двух катушек, верхние стороны которых находятся в пазах 1 и 2; седьмая

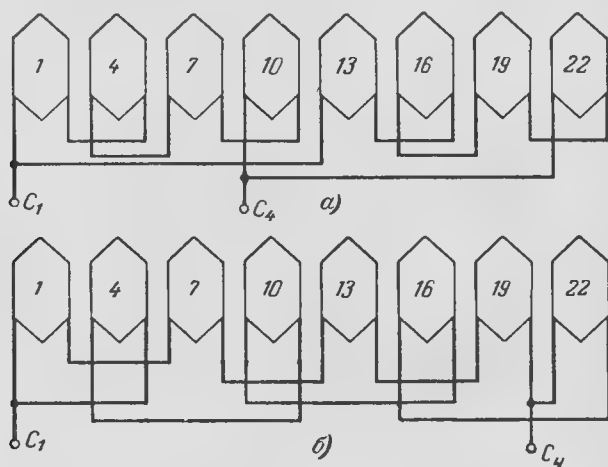


Рис. 20. Сосредоточенное (а) и распределенное (б) соединение параллельных ветвей.

катушечная группа соответственно состоит из катушек, верхние стороны которых находятся в пазах 13 и 14 и т. д.), а во вторую параллельную ветвь первой фазы включить катушечные группы 4, 10, 16 и 22. Аналогично образовать параллельные соединения и в остальных двух фазах. Теперь уже катушечные группы каждой параллельной ветви распределены по всей окружности статора. Схематически расположение сосредоточенных и распределенных параллельных ветвей фазы обмотки показано на рис. 20.

Как же влияет способ образования параллельных ветвей на работу обмотки и всей электрической машины? Для идеального случая, когда воздушный зазор машины строго одинаков по всей окружности и магнитные взаимодействия ротора и статора равномерны по всей окружности, оба способа равноценны. В этом случае способ

сосредоточенных параллельных ветвей предпочтительней лишь потому, что внутримашинные схемные соединения несколько проще выполнить, чем при распределенном способе; соответственно требуется меньше изоляционных материалов.

Последнее имеет немаловажное значение для крупных машин высокого напряжения.

Но предположим, что по каким-либо причинам воздушный зазор по окружности статора неодинаков (рис. 20), например, произошло проседание ротора вследствие выработки баббитовой заливки подшипников. При этом возникает прогрессирующая сила одностороннего магнитного притяжения ротора, которая в еще большей степени увеличивает давление вала ротора на подшипники и в конце концов может привести к аварии машины. В таком случае предпочтительнее была бы обмотка с сосредоточенными параллельными ветвями. Объяснение этому состоит в следующем: в тех участках окружности, где произошло уменьшение воздушного зазора, повышается индуктивное сопротивление элементов обмотки, прилегающих к этим местам. Наоборот, где увеличился воздушный зазор, индуктивное сопротивление элементов обмотки снижается; в предыдущем разделе мы отмечали, что полное сопротивление обмотки и, следовательно, величина тока в ней в основном зависят от ее индуктивности.

Исходя из вышесказанного, в параллельных сосредоточенных ветвях (рис. 20,а) проходят разные по величине токи, а именно: в верхней ветви больший ток, а в нижней меньший. Так как сила взаимодействия ротора со статором на отдельных участках расточки зависит не только от величины воздушного зазора между ротором и статором, но и от токов, проходящих по обмоткам ротора и статора на этих участках, то больший ток в верхней параллельной ветви будет как бы подтягивать ротор вверх, облегчая давление его на подшипники. Заметим, что положительное действие сосредоточенных параллельных ветвей сопровождается отрицательным — увеличением тока в одной из параллельных ветвей, что может привести к нежелательным последствиям, если сечение проводов обмотки не имеет соответствующего запаса.

Достоинством распределенных параллельных ветвей является то, что токи в них всегда одинаковы, вне зави-

симости от состояния воздушного зазора. Но, разумеется, такое соединение не способствует выравниванию магнитных сил взаимодействия ротора со статором при смещении зазора.

Общие рекомендации по выбору способа образования параллельных ветвей могут быть следующими.

В статорах асинхронных двигателей, где воздушный зазор делается минимально допустимым по механическим условиям работы узлов машины, даже при незначительном нарушении соосности статора и ротора (на 0,2—0,3 мм) разница между максимальной и минимальной величинами воздушного зазора в диаметрально противоположных точках окружности расточки может составить 100% и более. Силы одностороннего магнитного притяжения при этом могут достигнуть больших величин. Следовательно, надо применить сосредоточенные параллельные ветви.

В статорах синхронных двигателей и генераторов, где расчетный воздушный зазор сравнительно велик, небольшое нарушение соосности статора и ротора по тем или иным причинам не приводит к существенной разнице между максимальным и минимальным воздушным зазором и, следовательно, к образованию опасных магнитных сил. В этих случаях следует применить распределенную параллельную обмотку, которая предохраняет параллельные ветви от перегрузки током.

Следует заметить, что часто (в особенности для вертикальных синхронных гидрогенераторов) даже при очень большом воздушном зазоре применяют все же сосредоточенные параллельные ветви, если условия монтажа и эксплуатации не могут предотвратить значительных изменений величины воздушного зазора.

Таким образом, при составлении схемы обмотки какой-либо конкретной электрической машины следует выбрать тот или иной способ образования параллельных ветвей в зависимости от параметров обмотки, конструкции механических узлов и предполагаемых эксплуатационных условий.

Возможное число параллельных ветвей обмотки a с целым числом пазов на полюс и фазу определяется требованием, по которому отношение $2p/a$ должно выражаться целым числом, так как указанное отношение равно числу катушечных групп, приходящихся на каждую параллельную ветвь; а это число, естественно, не

может быть дробным. Отсюда следует, что число параллельных ветвей может быть равно 1; 2; p и $2p$ при любом числе полюсов машины.

Число параллельных ветвей может быть равно $p/2$, $p/3$, $p/4$, p/n только в обмотках, число полюсов которых делится соответственно на 4, 6, 8, ..., $2n$, т. е. число параллельных ветвей может быть равно:

$p/2$	— для обмоток, имеющих	4, 8, 12, 16 полюсов и т. д.	
$p/3$	"	"	6, 12, 18, 24 "
$p/4$	"	"	8, 16, 24, 32 "
$p/5$	"	"	10, 20, 30, 40 "
$p/6$	"	"	12, 24, 36, 48 "

В табл. 1 приведены данные о возможном числе параллельных ветвей при различных числах полюсов обмотки, составленные из требования, по которому $2p/a$ должно быть целым числом.

Таблица 1

Число полюсов	Возможное число параллельных ветвей
2	1, 2
4	1, 2, 4
6	1, 2, 3, 6
8	1, 2, 4, 8
10	1, 2, 5, 10
12	1, 2, 3, 4, 6, 12
14	1, 7, 14
16	1, 2, 4, 8, 16
18	1, 2, 3, 6, 9, 18
20	1, 2, 4, 5, 10, 20
22	1, 2, 11, 22
24	1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 24

В качестве примеров на рис. 21—24 приведены схемы обмоток, имеющих соответственно 3, 4, 6 и 8 параллельных ветвей в фазе для различного числа пазов статора.

Обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу. Выше рассматривались схемы обмоток, в которых q являлось целым числом. Однако q может быть и не целым числом. Например, при $z=30$; $2p=4$ и $m=3$ число пазов на полюс и фазу $q = \frac{z}{2pm} = \frac{30}{4 \cdot 3} = 2\frac{1}{2}$.

Дробное число пазов на полюс и фазу показывает, что в обмотке катушечные группы не все одинаковы:

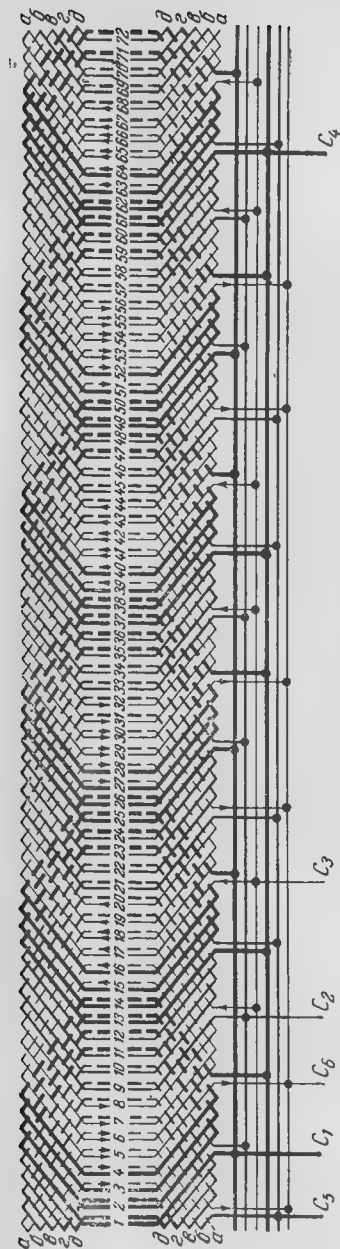


Рис. 23. Схема двухслойной обмотки. $2p=6$; $z=72$; $y_z=10$; $a=6$.

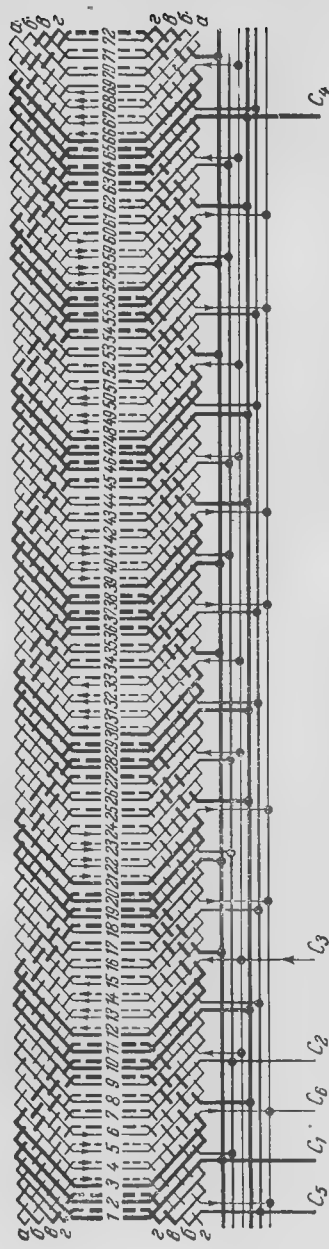


Рис. 24. Схема двухслойной обмотки. $2p=8$; $z=72$; $y_z=8$; $a=8$.

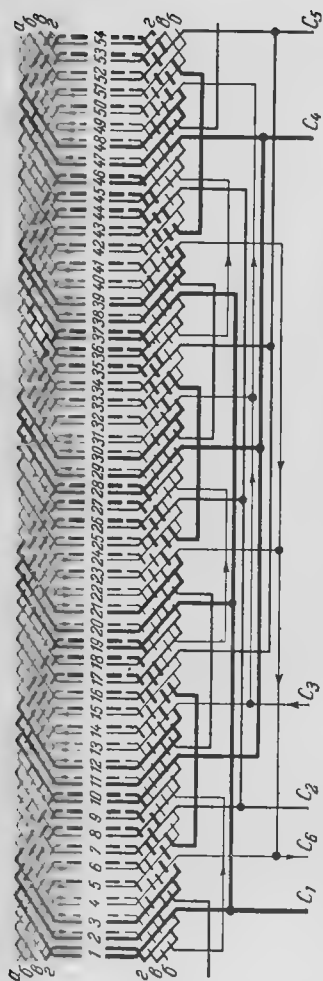


Рис. 21. Схема двухслойной обмотки. $2p=6$; $z=54$; $y_2=7$; $a=3$.

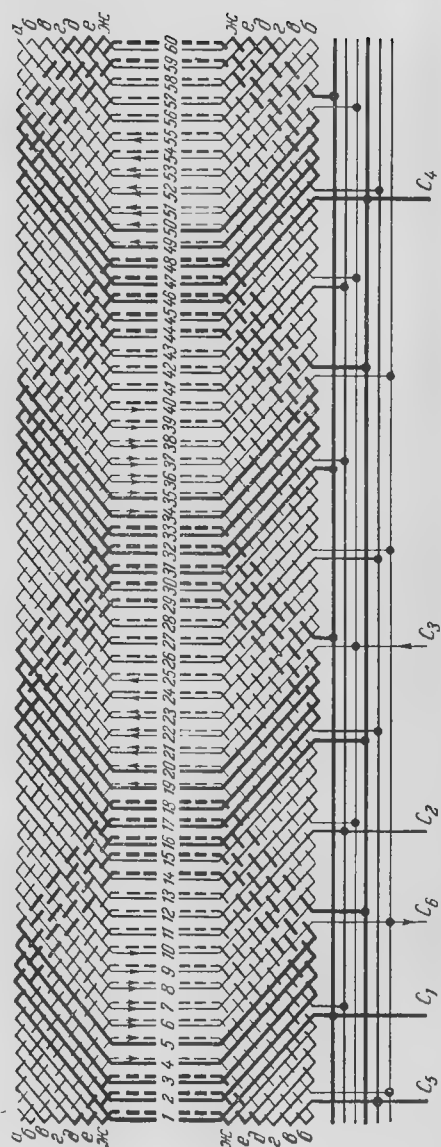


Рис. 22. Схема двухслойной обмотки. $2p=4$; $z=60$; $y_2=13$; $a=4$.

в некоторых катушечных группах число катушек на одну больше, чем в других.

В общем случае дробное число пазов на полюс и фазу представляется в виде целого числа и правильной дроби:

$$q = b + \frac{c}{d}.$$

Часть катушечных групп комплектуется из $b+1$ катушек, а часть — из b катушек.

Например, при $q=1\frac{1}{2}$ половина катушечных групп выполняется из $b=1$ катушки, а половина — из $b+1=2$ катушек.

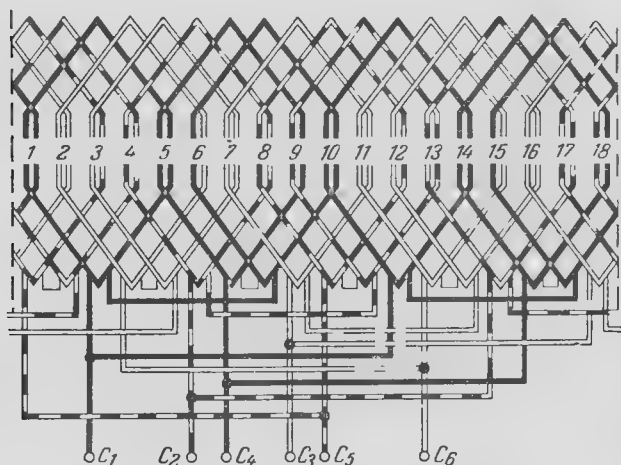


Рис. 25. Схема двухслойной обмотки.

$2\tau=4$, $z=18$; $q=1\frac{1}{2}$.

На рис. 25 приведена схема соединений обмотки с $q=1\frac{1}{2}$, в которой группы из двух и одной катушек чередуются между собой.

Условно чередование катушечных групп по окружности статора в приведенной схеме записывается: (1-2), (1-2), (1-2) и т. д.

Однако указанное несложное чередование катушечных групп имеет место, когда дробная часть q равна $\frac{1}{2}$ (например, $q=1\frac{1}{2}$; $q=2\frac{1}{2}$; $q=3\frac{1}{2}$ и т. д.). При других

значениях дробной части это сочетание бывает сложней. Например, при $q=1^2/7$ оно будет:

(1-2-1-1-1-2-1), (1-2-1-1-1-2-1) и т. д.

В табл. 2 приводится чередование катушечных групп при различных значениях q .

Таблица 2

Число пазов на полюс и фазу q	Чередование катушечных групп
$1^{1/2}$	(1-2), (1-2) и т. д.
$1^{1/4}$	(1-1-1-2), (1-1-1-2) и т. д.
$1^{3/4}$	(1-2-2-2), (1-2-2-2) и т. д.
$1^{1/5}$	(1-1-1-1-2), (1-1-1-1-2) и т. д.
$1^{2/5}$	(2-1-2-1-1), (2-1-2-1-1) и т. д.
$1^{3/5}$	(1-2-1-2-2), (1-2-1-2-2) и т. д.
$1^{4/5}$	(1-2-2-2-2), (1-2-2-2-2) и т. д.
$1^{1/7}$	(1-1-1-1-1-1-2), (1-1-1-1-1-1-2) и т. д.
$1^{2/7}$	(1-2-1-1-1-2-1), (1-2-1-1-1-2-1) и т. д.
$1^{3/7}$	(1-2-1-2-1-2-1), (1-2-1-2-1-2-1) и т. д.
$1^{4/7}$	(2-1-2-1-2-1-2), (2-1-2-1-2-1-2) и т. д.
$1^{5/7}$	(2-1-2-2-1-2-1), (2-1-2-2-1-2-1) и т. д.
$1^{6/7}$	(2-2-2-2-1-2-2), (2-2-2-2-1-2-2) и т. д.
$1^{1/8}$	(2-1-1-1-1-1-1-1), (2-1-1-1-1-1-1-1) и т. д.
$1^{3/8}$	(2-1-2-1-1-2-1-1), (2-1-2-1-1-2-1-1) и т. д.
$1^{5/8}$	(2-2-1-2-2-1-2-1), (2-2-1-2-2-1-2-1) и т. д.
$1^{7/8}$	(2-2-2-2-2-2-2-1), (2-2-2-2-2-2-2-1) и т. д.
$1^{1/10}$	(2-1-1-1-1-1-1-1-1-1), (2-1-1-1-1-1-1-1-1-1) и т. д.
$1^{3/10}$	(2-1-1-2-1-1-2-1-1-1), (2-1-1-2-1-1-2-1-1-1) и т. д.
$1^{7/10}$	(2-2-2-1-2-2-1-2-2-1), (2-2-2-1-2-2-1-2-2-1) и т. д.
$1^{1/10}$	(2-2-2-2-2-2-2-2-2-1), (2-2-2-2-2-2-2-2-2-1) и т. д.

Примечание. Для нахождения порядка чередования катушечных групп для q , отличающихся от приведенных в таблице на целое число, надо к каждой цифре в периоде чередования прибавить разность между этим числом и единицей.

Например, период чередования для $q=1^{1/4}$ указан в табл. 2 (1-1-1-2), (1-1-1-2) и т. д. Следовательно, период чередования для $q=2^{1/4}$ составит: (2-2-2-3), (2-2-2-3) и т. д.; период чередования для $q=3^{1/4}$ составит: (3-3-3-4), (3-3-3-4) и т. д.

Для определения порядка чередования катушечных групп по окружности статора, помимо таблиц, существует несколько практических способов. Наиболее простой из них состоит в следующем. Для $q=b+c/d$ составляют таблицу из c строк и d столбцов. В таблицу, начиная с верхней строки первого столбца, вписывают вертикально, сверху вниз c чисел, равных $b+1$, а затем $d-c$ чисел, равных b , потом снова c чисел, равных $b+1$, и $d-c$ чисел, равных b , и т. д. Таким образом заполняется вся таблица.

Таблица 3

Число пазов статора

Число полюсов	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69
2	$3\frac{1}{2}$	4	$4\frac{1}{2}$	5	$5\frac{1}{2}$	6	$6\frac{1}{2}$	7	$7\frac{1}{2}$	8	$8\frac{1}{2}$	9	$9\frac{1}{2}$	10	—	—	—
4	$1\frac{3}{4}$	2	$2\frac{1}{4}$	$2\frac{1}{2}$	$2\frac{3}{4}$	3	$3\frac{1}{4}$	$3\frac{1}{2}$	$3\frac{3}{4}$	4	$4\frac{1}{4}$	$4\frac{1}{2}$	$4\frac{3}{4}$	5	$5\frac{1}{4}$	$5\frac{1}{2}$	$5\frac{3}{4}$
6	—	—	$1\frac{1}{2}$	—	—	2	—	—	$2\frac{1}{2}$	—	—	3	—	—	$3\frac{1}{2}$	—	—
8	—	1	$1\frac{1}{8}$	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{3}{8}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{5}{8}$	$1\frac{3}{4}$	$1\frac{7}{8}$	2	$2\frac{1}{8}$	$2\frac{1}{4}$	$2\frac{3}{8}$	$2\frac{1}{2}$	$2\frac{5}{8}$	$2\frac{3}{4}$	$2\frac{7}{8}$
10	—	—	—	1	$1\frac{1}{10}$	$1\frac{1}{5}$	$1\frac{3}{10}$	$1\frac{2}{5}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{5}$	$1\frac{7}{10}$	$1\frac{4}{5}$	$1\frac{9}{10}$	2	$2\frac{1}{10}$	$2\frac{1}{5}$	$2\frac{3}{10}$
12	—	—	—	—	—	1	—	—	$1\frac{1}{4}$	—	—	$1\frac{1}{2}$	—	—	$1\frac{3}{4}$	—	—

Продолжение табл. 3

Число пазов статора

Число полюсов	72	75	78	81	84	87	90	93	96	99	102	105	108	111	114	117	120
2	—	$6\frac{1}{4}$	$6\frac{1}{2}$	$6\frac{3}{4}$	7	$7\frac{1}{4}$	$7\frac{1}{2}$	$7\frac{3}{4}$	8	—	—	—	—	—	—	—	—
4	6	—	—	$6\frac{1}{2}$	7	$7\frac{1}{4}$	$7\frac{1}{2}$	$7\frac{3}{4}$	8	—	—	—	—	—	—	—	—
6	4	—	—	$6\frac{1}{2}$	7	$7\frac{1}{4}$	5	—	—	$5\frac{1}{2}$	—	—	6	—	—	$6\frac{1}{2}$	—
8	3	$3\frac{1}{8}$	$3\frac{1}{4}$	$3\frac{3}{8}$	$3\frac{1}{2}$	$3\frac{5}{8}$	$3\frac{3}{4}$	$3\frac{7}{8}$	4	$4\frac{1}{8}$	$4\frac{1}{4}$	$4\frac{3}{8}$	$4\frac{1}{2}$	$4\frac{5}{8}$	$4\frac{3}{4}$	$4\frac{7}{8}$	5
10	$2\frac{2}{5}$	$2\frac{1}{2}$	$2\frac{3}{5}$	$2\frac{7}{10}$	$2\frac{4}{5}$	$2\frac{9}{10}$	3	$3\frac{1}{10}$	$3\frac{1}{5}$	$3\frac{3}{10}$	$3\frac{2}{5}$	$3\frac{1}{2}$	$3\frac{3}{5}$	$3\frac{7}{10}$	$3\frac{4}{5}$	$3\frac{9}{10}$	4
12	2	—	—	$2\frac{1}{4}$	—	—	$2\frac{1}{2}$	—	—	$2\frac{3}{4}$	—	—	3	—	—	$3\frac{1}{4}$	—

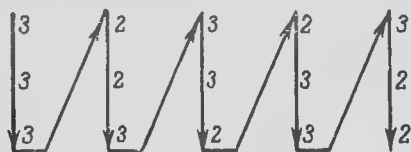
Таблица 4

Число полюсов	Возможные числа параллельных ветвей при числе пазов																	
	9	15	18	21	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66
2	1	1	—	1	1	—	1	—	1	—	1	—	1	—	1	—	—	—
4	—	1	1; 2	1	1	1; 2	1	—	1	1; 2	1	—	1	1; 2	1	—	1	1; 2
6	—	—	—	—	1; 3	—	—	—	—	—	1; 3	—	—	—	—	—	1; 3	—
8	—	—	—	—	1	1; 2	1	1; 2; 4	1	1; 2	1	—	1	1; 2	1	1; 2; 4	1	1; 2
10	—	—	—	—	—	—	1	1; 2	1	1; 2	1; 5	1; 2	1	1; 2	1	—	1	1; 2
12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1; 3	—	—	1; 2; 3; 6	—	—	1; 3	—

Продолжение табл. 4

Число полюсов	Возможные числа параллельных ветвей																
	69	72	75	78	81	84	87	90	93	96	99	102	105	108	111	114	117
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	1	—	1	1; 2	1	—	1	1; 2	1	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	1; 3	—	—	—	—	—	1; 8	—	—	—	—	—	1; 3
8	1	—	1	1; 2	1	1; 2; 4	1	1; 2	1	—	1	1; 2	1	1; 2; 4	1	1; 2	1
10	1	1; 2	1; 5	1; 2	1	1; 2	1	—	1	1; 2	1	1; 2	1; 5	1; 2	1	1; 2	1
12	—	—	—	—	1; 3	—	—	1; 2; 3; 6	—	—	1; 3	—	—	—	—	—	1; 3

Например для $q=2^{3/5}$ эта таблица состоит из трех строк и пяти столбцов и заполняется в следующем, указанном стрелками порядке:



Чередование катушечных групп по окружности статора можно брать по любой строке таблицы.

Для образования симметричной двухслойной обмотки для машин с различными числами полюсов q не может быть любым дробным числом. Выполнимое число пазов на полюс и фазу для данного числа полюсов машины приведено в табл. 3.

Необходимое условие образования параллельных ветвей при дробном q — отношение $2p/ad$ должно быть целым числом. Это обеспечит одинаковое количество больших (с числом катушек b_1+1) и малых (с числом катушек b) катушечных групп в каждой параллельной ветви.

Из условия образования параллельных ветвей следует, например, что:

a не может быть равным $2p$ для всех обмоток; a может быть равным 2 для четырехполюсных обмоток при $q=1^{1/2}, 2^{1/2}, 3^{1/2}$ и т. д. и восьмиполюсных обмоток при $q=1^{1/4}, 1^{1/2}, 1^{3/4}$ и т. д. Для шестиполюсных обмоток a не может быть равным 2; a может быть равным 3 для шестиполюсных обмоток при $q=1^{1/2}, 2^{1/2}, 3^{1/2}$ и т. д. и двенадцатиполюсных обмоток при $q=1^{1/4}, 1^{1/2}, 1^{3/4}$ и т. д.

Возможные числа параллельных ветвей для двухслойных обмоток с дробным q более ограничены, чем в обмотках с целым числом пазов на полюс и фазу.

В табл. 4 приведены данные о возможных числах параллельных ветвей при различных числах пазов и полюсов статора при дробном q (прочеркнуты места, где q — целое число).

3. УПРОЩЕННЫЕ СПОСОБЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ СХЕМ ОБМОТОК

Рассмотренный нами способ изображения схем обмоток в виде развертки окружности статора на плоскости достаточно нагляден и дает полное представление о параметрах обмотки.

То же самое можно сказать о способе изображения схем, который мы использовали для рис. 14 и 15. Его иногда называют способом кольцевой развертки (нельзя смешивать с кольцевой обмоткой статора, применяемой в отдельных случаях для статоров микромашин специального назначения).

Но эти способы изображения схем имеют существенный недостаток, заключающийся в сложности и трудоемкости их выполнения, в особенности для статоров с большим количеством пазов и полюсов. Изображение схемы способом кольцевой развертки вообще затруднительно, так как требует точной разбивки по числу пазовых делений и построения криволинейных лобовых частей.

Кроме того, при большом количестве пазов и полюсов статора схема в виде развертки статора на плоскости теряет одно из главных качеств способа — наглядность. Так, например, если нам необходимо составить схему для статора, имеющего 360 пазов (для тихоходных машин такое большое число пазов не является редкостью), и расстояние между линиями соседних пазов на чертеже мы возьмем 5 мм, то общая длина чертежа будет около 2 м. Понятно, что на таком чертеже трудно ориентироваться и уловить, например, принцип построения параллельных ветвей, не говоря уже о том, что вычертить такую схему потребуются много времени.

Существует несколько упрощенных способов составления схем обмоток, которые для практических целей вполне заменяют развернутые схемы, а с точки зрения принципа выполнения внутримашинных соединений обмотки, являются даже более наглядными, чем развернутые.

Упрощенные способы применяются, главным образом, для изображения схем двухслойных обмоток.

Основным элементом упрощенной схемы является катушечная группа, состоящая из q катушек; последние, как мы уже знаем, внутри катушечной группы соединяются всегда последовательно. Таким образом, обмотчику для его практической работы достаточно дать руководство, которое в простой и удобной форме указывало бы на порядок соединения между собой катушечных групп.

На рис. 26,а показана катушечная группа обмотки с $q=3$ и шагом обмотки 1—8. Условимся за начало катушечной группы считать вывод, идущий из верхнего

слоя паза 1, за конец катушечной группы — вывод, идущий из нижнего слоя паза 10.

Понятно, что каждая катушечная группа будет иметь два конца — нижний и верхний, вне зависимости от числа катушек, входящих в нее, или шага обмотки.

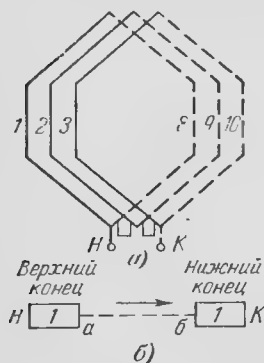


Рис. 26. Катушечная группа упрощенной схемы.

Чтобы не вычерчивать каждый раз катушечные группы, в упрощенной схеме их изображают в виде пунктирной линии $a-b$ (рис. 26,б). При этом будем считать, что левый прямоугольник означает верхний, а правый — нижний концы катушечной группы.

Общее число катушечных групп в двухслойной трехфазной обмотке всегда равно $6p$ (так как число катушечных групп в фазе равно $2p$).

Тогда, например, для восьми-полюсной обмотки (см. рис. 18) общее число групп будет 24, соответственно каждая катушечная группа будет иметь номер с 1 по 24.

Если условиться, что катушечная группа 1 принадлежит фазе I, а в каждую фазу включаются катушечные группы, расположенные по статору через две группы, принадлежащие другим фазам, то остальные катушечные группы фазы I будут иметь номера, отличающиеся на три, а именно: 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22.

В фазу II, начинающуюся с группы 3, войдут катушечные группы с номерами: 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 и 24. Номера катушечных групп фазы III будут: 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23 и 2.

Пользуясь принятым условным изображением катушечной группы, на рис. 27,а приведены все катушечные группы обмотки с $2p=8$.

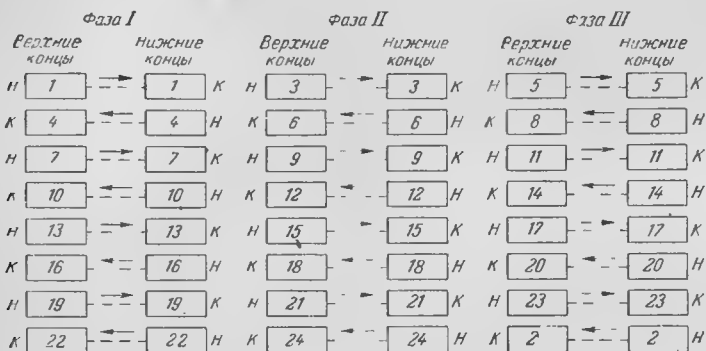
Если верхний конец первой катушечной группы фазы I принять за начало катушечной группы, то нижний конец этой группы будет концом первой катушечной группы.

Такое же распределение начал и концов получим для всех нечетных катушечных групп фазы I.

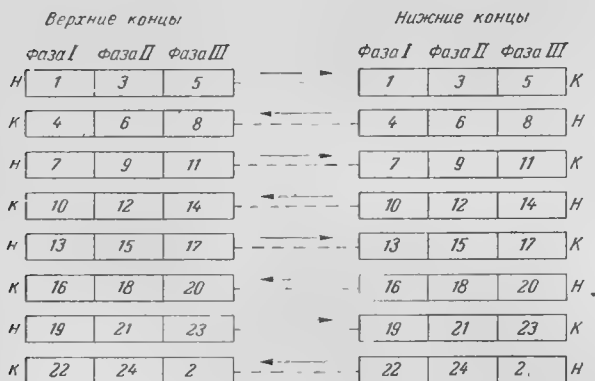
В четных катушечных группах этой фазы наименование концов будет противоположным. То же самое наи-

менование концов катушечных групп получаем и для фаз II и III. В соответствии с этим правилом расставлены буквы *Н* и *К* около каждой катушечной группы.

Так как соединение катушечных групп в фазах совершенно одинаково, то при составлении упрощенных



а)



б)

Рис. 27. Катушечные группы двухслойной обмотки, $2p=8$.

схем описываемым способом соответственные катушечные группы всех трех фаз объединяют (рис. 27,б).

Таким же образом можно составить схему для обмотки с любым числом полюсов, причем число горизонтальных рядов в схеме будет всегда равно числу полюсов обмотки.

Вертикальные ряды включают номера катушечных групп, входящих в данную фазу, причем номера последних катушечных групп в зависимости от числа полюсов машины будут:

$$\begin{array}{lll} \text{для фазы I} & - & 6p - 2 \\ \text{„ „ II} & - & 6p \\ \text{„ „ III} & - & 2 \end{array}$$

Например для машины с $2p=48$

$$\begin{array}{lll} \text{для фазы I} & - & 6 \cdot 24 - 2 = 142 \\ \text{„ „ II} & - & 6 \cdot 24 = 144 \\ \text{„ „ III} & - & 2 \end{array}$$

Соединение катушечных групп на упрощенной схеме в зависимости от числа параллельных ветвей в фазе производится следующим образом.



Рис. 28. Последовательное соединение катушечных групп, $2p=8$.

При $a=1$ (последовательное соединение) все строки соединяются перемычками, образуя непрерывную «змейку» при последовательном прохождении всех катушечных групп фазы. На рис. 28 показано такое соединение. Из этого рисунка видно, что катушечные группы соединяются между собой одноименными выводами (нижний с нижним, верхний с верхним), а для принятого нами обозначения начал и концов катушечных групп конец предыдущей катушечной группы соединяется с началом последующей

При параллельном соединении (для любого возможного числа параллельных ветвей данной обмотки) направление обхода по всем горизонтальным строкам в каждой параллельной ветви, если начинать обход от

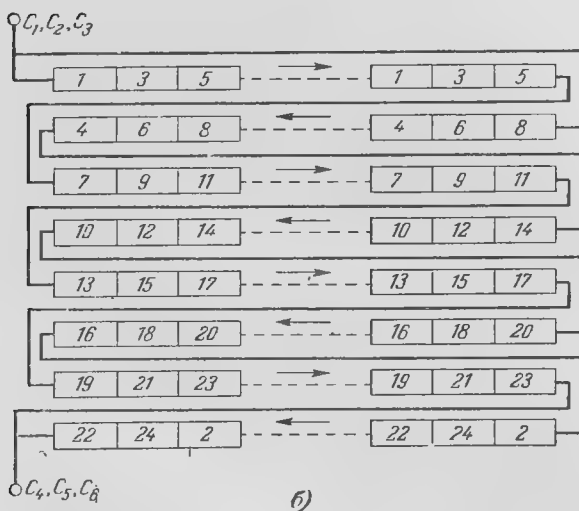
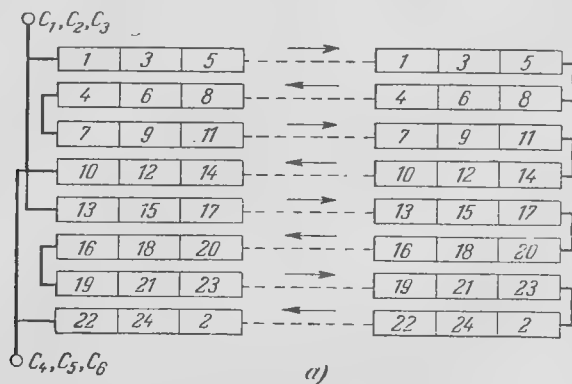


Рис. 29. Соединение катушечных групп, $2p=8$; $u=2$.

начала фазы, должно совпадать с направлением обхода горизонтальных строк по «змейке» при последовательном соединении. Направления обхода горизонтальных строк на рис. 28 и 29 показаны стрелками.

В соответствии с этим правилом на рис. 29 показано соединение обмотки с $2p=8$ в две параллельных ветви двумя уже известными нам способами — сосредоточенным (рис. 29,а) и распределенным (рис. 29,б).

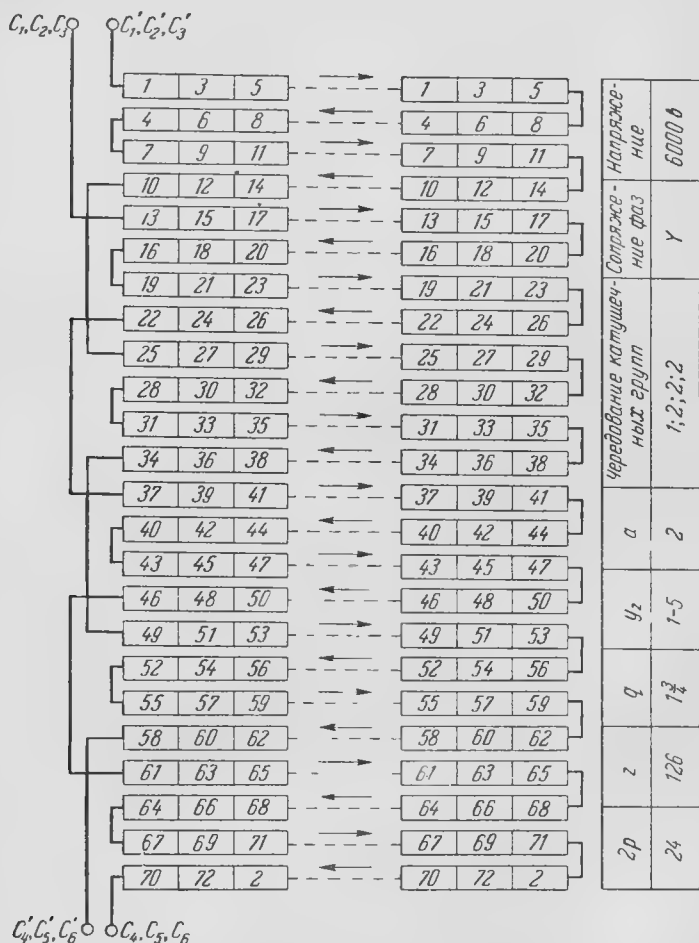


Рис. 30. Упрощенная схема двухслойной обмотки с таблицей основных данных.

Рассмотренный упрощенный способ изображения схемы обмотки статора двигателей переменного тока, например, принят на заводе «Электросила» и может встре-

таться в заводской документации при получении двигателя. Но поскольку этот способ не дает полного представления о всех параметрах обмоток (по схемам рис. 28 и 29 нельзя определить шаг обмотки, способ соединения фаз, числа z и q , чередование катушечных групп по окружности статора при дробном q), то заводской чертеж обычно дополняется соответствующей таблицей. На рис. 30 представлен чертеж схемы обмотки статора синхронного двигателя с $2p=24$ в таком виде, как это обычно выполняется в заводской документации. Заметим, что параллельные ветви в этой обмотке выполнены распределенным способом, как для большинства синхронных двигателей, в соответствии с изложенными выше соображениями.

Приведем еще один упрощенный способ составления схем двухслойных обмоток, который также часто применяется в практике и даже имеет некоторые преимущества перед только что рассмотренным. Эти преимущества заключаются в том, что по изображенной схеме с принятыми условными обозначениями можно определить не только число полюсов машины и характер соединения параллельных ветвей, но также и числа q и z , чередование катушечных групп по окружности статора и в фазе для обмоток с дробным q и способ соединения фаз.

Основным элементом схемы здесь также является катушечная группа, изображенная так, как это дано на рис. 31. Цифра в левом верхнем углу прямоугольника обозначает порядковый номер данной катушечной группы по окружности статора, цифра в правом нижнем углу соответствует числу катушек в этой катушечной группе.

Обозначение начал и концов катушечных групп в этом способе несколько отличается от обозначений, принятых в предыдущем способе. А именно, для рассматриваемого способа все левые выводы катушечных групп являются нижними (выходящими со дна паза первой катушки в группе) и называются *началами*, все правые выводы катушечных групп являются верхними (выходящими из верхнего слоя последней катушки в группе) и называются *концами*. Такое обозначение



Рис. 31. Условное изображение катушечной группы.

соответствует технологическому исполнению схемы обмотки, так как все выводы фаз (начала и концы) в подавляющем большинстве обмоток берутся из нижнего слоя катушек.

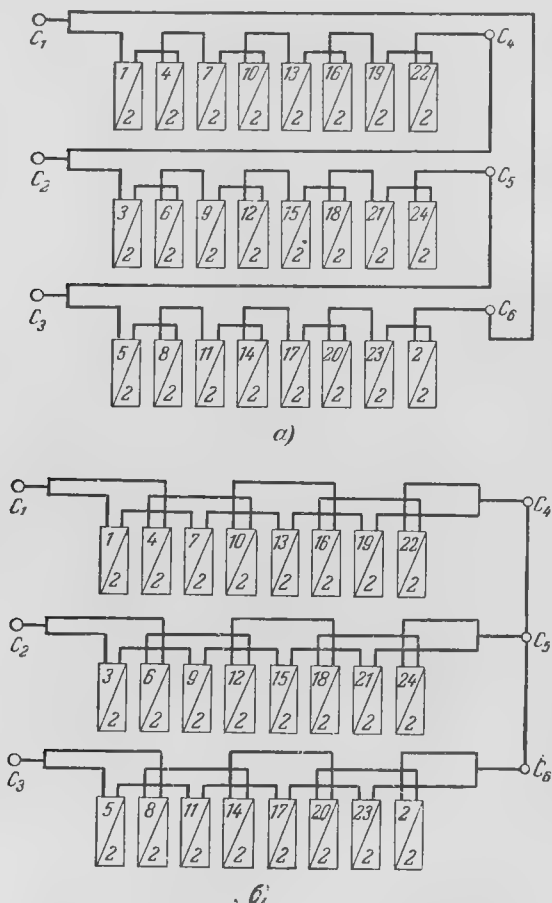


Рис. 32. Схема обмоток, $2p=8$; $z=48$; $q=2$.

Для примера возьмем ту же обмотку (рис. 18), для которой уже был составлен ряд упрощенных схем по первому способу. Упрощенная схема этой обмотки по второму способу при последовательном соединении всех катушечных групп в фазе представлена на рис. 32,а и сое-

диненная в две распределенные параллельные ветви — на рис. 32,б. Как видно из этих рисунков, изображение фаз — раздельное; номера катушечных групп соответствуют их последовательному расположению по окружности статора; соответственные катушечные группы разных фаз (например, 1, 3 и 5 и т. д.) располагаются друг под другом. Основное правило соединения катушечных групп между собой состоит в следующем: нечетная с четной катушечные группы соединяются между собой одноименными выводами катушечных групп (либо левыми — нижними, либо правыми — верхними).

Нечетные группы между собой или четные между собой соединяются разноименными выводами катушечных групп.

Соединение фаз на схеме рис. 32,а — в треугольник, на схеме рис. 32,б — в звезду.

Подобным способом изображения схем удобно пользоваться для случаев обмоток с дробным q . На рис. 33 представлена ранее уже показанная на рис. 30 схема для обмотки $2p=24$, $q=1\frac{3}{4}$, изображенной первым способом. Сравнивая рис. 30 и 33, предпочтение следует отдать способу, показанному на рис. 33, так как при этом видно, какие катушечные группы состоят из одной и двух катушек, а также легко проверяется количество трехкатушечных групп в каждой параллельной ветви. Таким образом, можно рекомендовать пользоваться первым упрощенным способом при составлении схем двухслойных обмоток с целым числом q и вторым — для схем с дробным q .

Наряду с рассмотренными упрощенными схемами (их также называют универсальными) большое распространение получили торцевые, весьма удобные при электрообмоточных работах, так как по своему существу они являются монтажными схемами.

В этих схемах, так же как и в универсальных, показываются только внутримашинные соединения.

Для составления торцевой схемы чертится окружность и делится на $6p$ равных частей. Каждый из полученных отрезков дуги обозначает катушечную группу (число катушечных групп во всех трех фазах обмотки равно $6p$).

Концы дуг отгибают: один — к центру окружности (концы групп), другие — наружу (начала групп). Выводы катушечных групп нумеруют: начало первой группы

обозначают цифрой 1, конец — 2, начало второй катушечной группы — 3, конец — 4, начало третьей — 5, конец — 6 и т. д.

Начало первой катушечной группы принимают за начало фазы I. Тогда начала двух других фаз (как это имеет место в подавляющем большинстве схем трехфаз-

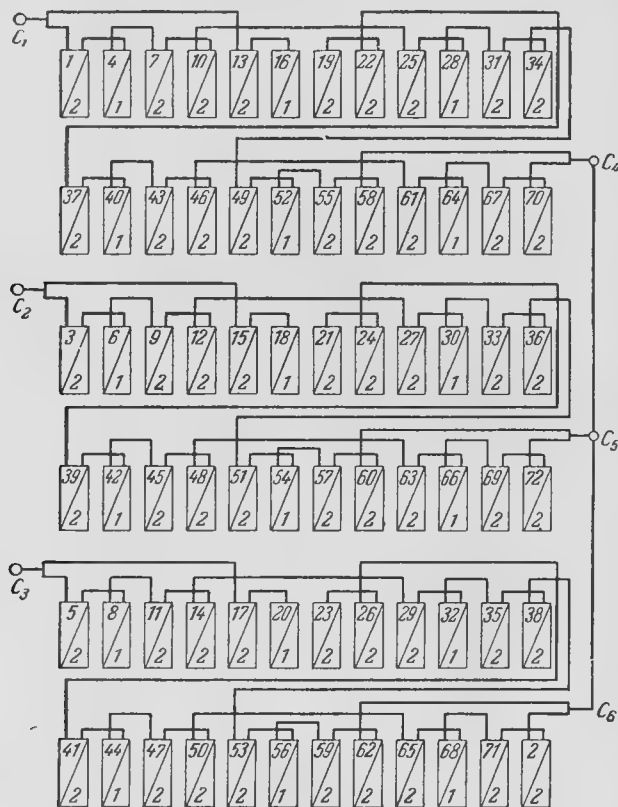


Рис. 33. Схема обмотки, $2p=24$; $z=126$; $q=1\frac{3}{4}$.

ных обмоток статоров) будут соответственно в третьей и пятой катушечных группах. Следовательно, по принятому условному обозначению выводов торцевой схемы началу I, II и III фазы будут соответственно принадлежать выводы 1, 5 и 9.

Далее обозначают условное направление тока в катушечных группах фазы I. Для этого задаются каким-

либо направлением тока в первой катушечной группе и отмечают его стрелкой.

Во второй катушечной группе этой же фазы направление тока будет обратное; в третьей и всех других нечетных группах показывают направление тока, совпа-

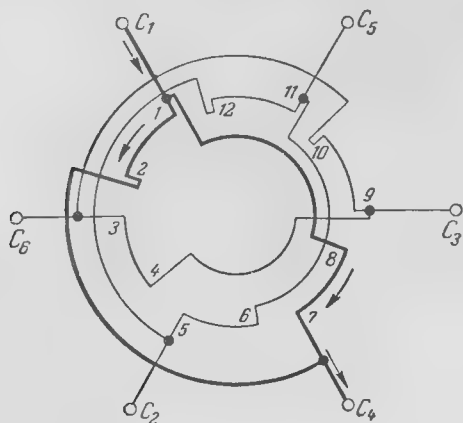


Рис. 34. Торцевая схема обмотки.
 $2p=2; a=2.$

дающее с направлением в первой группе; в четвертой катушечной группе и всех других четных группах совпадающим с направлением во второй группе.

В соответствии с заданным числом параллельных ветвей в фазе и соблюдая при этом указанное стрелками направление токов в катушечных группах, соединяют между собой катушечные группы.

Аналогичным образом формируются и две другие фазы.

В качестве примера приведем простейшие торцевые схемы для двухполюсной машины при $a=2$ (рис. 34) и для четырехполюсной машины — при $a=1$ (рис. 35), а также более слож-

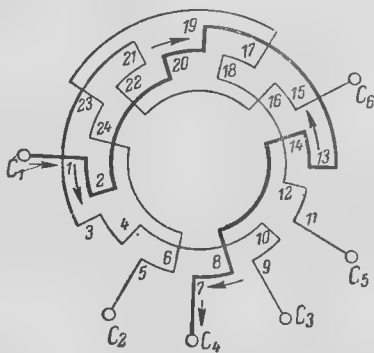


Рис. 35. Торцевая схема обмотки,
 $2p=2; a=1.$

ные схемы обмоток со следующими основными данными:

$$\begin{array}{ll} 2p=8, & a=2 \text{ (рис. 36)} \\ 2p=10, & a=10 \text{ (рис. 37)} \\ 2p=10, & a=2 \text{ (рис. 38, а)} \\ 2p=10, & a=2 \text{ (рис. 38, б)} \end{array}$$

Для машин с большим числом полюсов, например $2p=36$, $2p=48$, наносить на чертежи торцевой схемы все

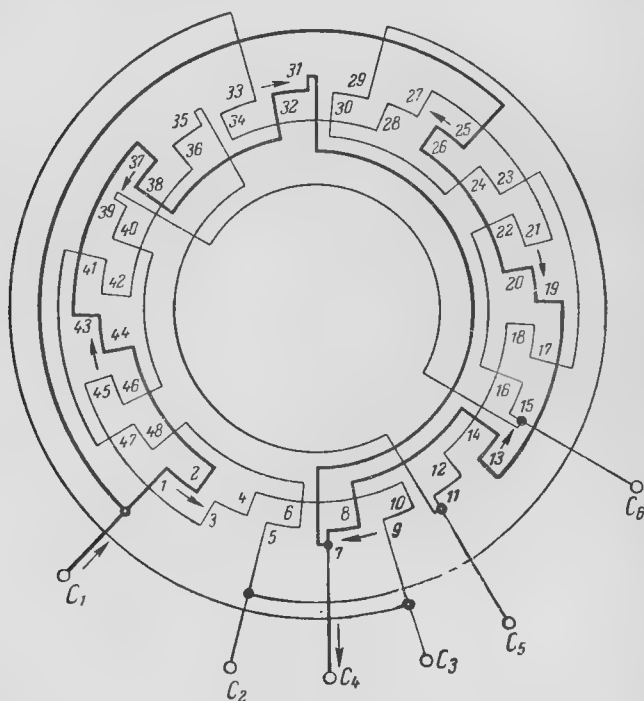


Рис. 36. Торцевая схема обмотки, $2p=8$; $a=2$.

межгрупповые соединения становится слишком затруднительным.

Поэтому в применяемых на практике торцевых схемах (например, в документации, прилагаемой к машинам завода «Уралэлектротяжмаш») изображаются только дуги, обозначающие катушечные группы с соответствующими номерами выводных концов катушечных групп

в принятом для торцевой схемы порядке. А вместо непосредственного изображения межгрупповых соединений чертеж схемы дополняется цифровой таблицей, указывающей порядок соединения между собой выводных концов катушечных групп. В этой же таблице обычно также указывается число полюсов машины, заданное число

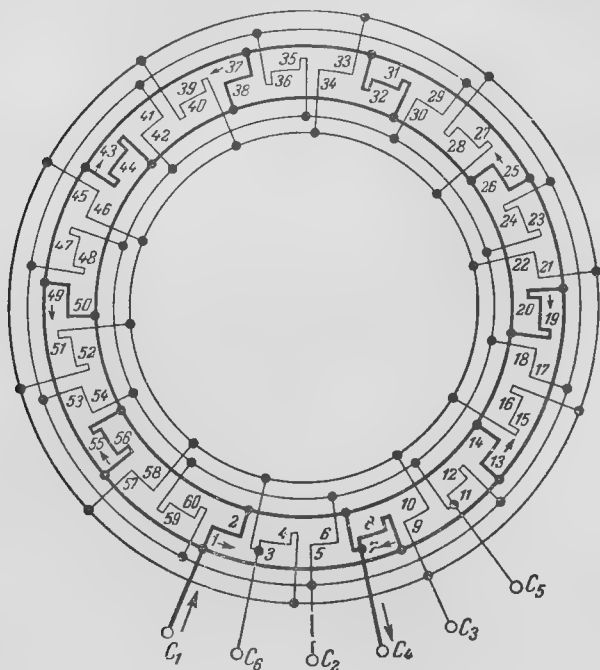


Рис. 37. Торцевая схема обмотки, $2p=10$; $a=10$.

параллельных ветвей в фазе и номера выводов катушечных групп, которые являются началами и концами фаз.

На рис. 39 представлена торцевая схема с цифровой таблицей в таком виде, как это имеет место в заводской документации.

На этой схеме, например, соединение 2—8 указывает, что конец первой группы, обозначенный цифрой 2, должен быть соединен с концом четвертой группы, обозначенным цифрой 8; соответственно каждая пара цифр, написанная через тире, обозначает одно межгрупповое соединение.

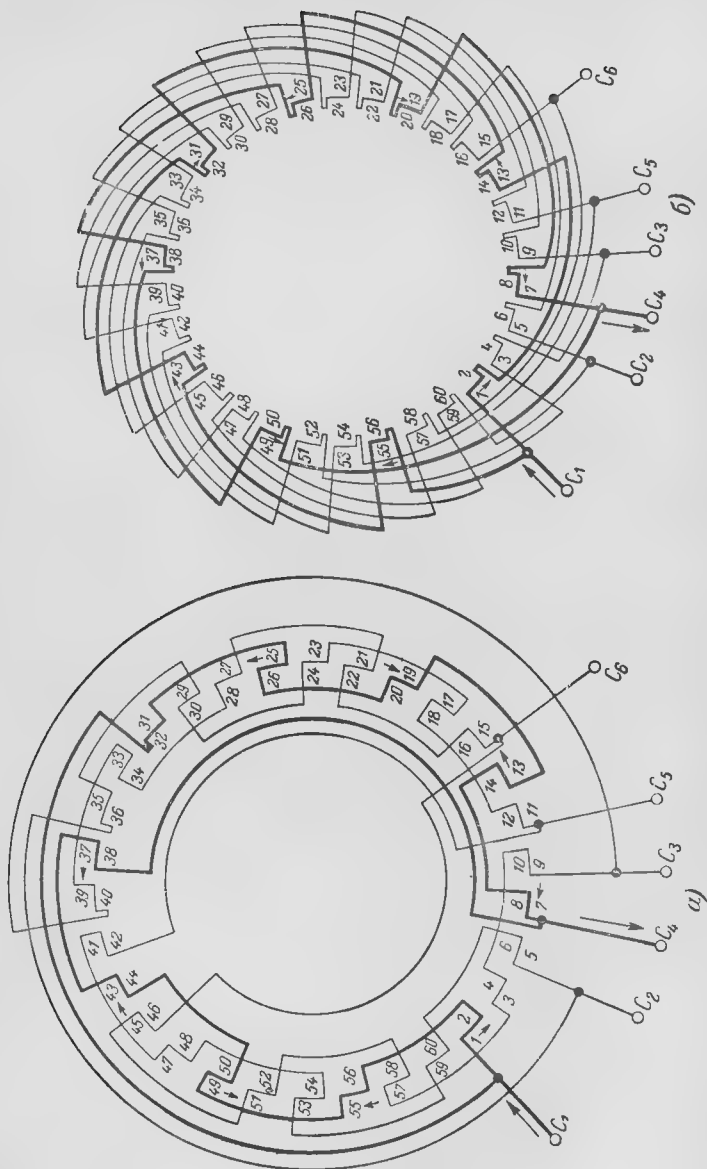


Рис. 38. Торцевая схема обмотки, $2p=10$; $a=2$.
 а — сосредоточенные параллельные ветви; б — то же распределенные.

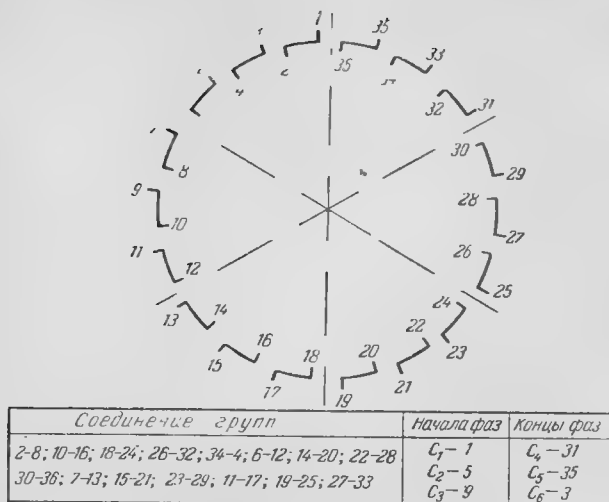


Рис. 39. Торцевая схема обмотки с цифровой таблицей, $2p=6$; $a=1$.

Следует заметить, что торцевая схема, так же как универсальная схема первого вида, не дает наглядного представления о составе катушечных групп в схемах с дробным q .



4. СХЕМЫ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК С НЕРАВНОВИТКОВЫМИ КАТУШКАМИ

В предыдущих параграфах брошюры, разбирая различные способы составления схем разного типа обмоток, мы считали, что все катушки данной обмотки одинаковы, так как имеют одно и то же число витков. Но при расчете электрической машины и, в частности, ее обмотки может оказаться, что необходимый магнитный поток машины получается при катушках с неодинаковым числом последовательно соединенных витков.

Для однослойной обмотки такой случай не требует каких-либо специальных приемов составления схемы. Просто каждая катушечная группа будет содержать катушки с различным числом витков; шаги катушек по

пазам и укладка их в пазы ничем не будут отличаться от нормальных случаев с равновитковыми катушками.

При составлении схем двухслойных обмоток с неравновитковыми катушками необходимо придерживаться определенных правил.

Обычно одну половину комплекта катушек изготавливают с одним числом витков, а другую половину — с числом витков, на один или два большим.

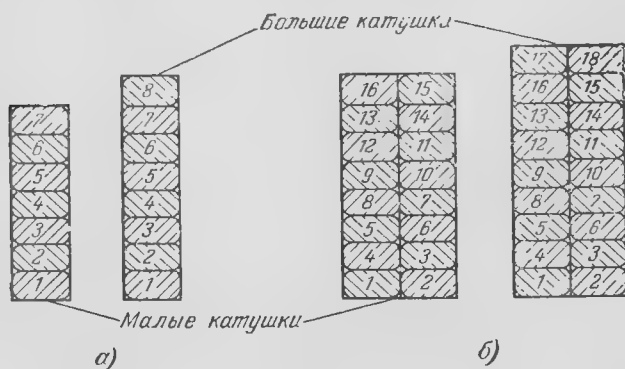


Рис. 40. Расположение витков в одностолбковых (а) и двухстолбковых (б) катушках.

Последнее зависит от способа расположения эффективных витков в пазовой части катушек.

В так называемых одностолбковых катушках, в которых по ширине паза лежит один эффективный проводник, разновитковые катушки будут отличаться на один виток; в двухстолбковых катушках, в которых по ширине паза лежат два эффективных проводника, разновитковые катушки будут отличаться на два витка. Схемы расположения витков в одно- и двухстолбковых катушках показаны на рис. 40.

Так, например, в результате электромагнитного расчета машины с двухслойной обмоткой статора при $z=24$, $2p=4$ и $m=3$ полное число эффективных проводников фазы N получилось равным 120. Это значит, что число эффективных проводников в пазу

$$N_z = \frac{Nm}{z} = \frac{120 \cdot 3}{24} = 15.$$

Так как число катушек двухслойной обмотки равно числу пазов, т. е. в данном случае 24, то половина катушек — 12 шт. должна быть выполнена семивитковыми, а другая половина — восьмивитковыми; при этом расположение эффективных проводов следует выбрать в один столбик (рис. 40,а).

Другой пример: для обмотки с теми же основными параметрами полное число эффективных проводников фазы получилось равным 272. Тогда

$$N_z = \frac{272 \cdot 3}{24} = 34.$$

В этом случае можно было бы изготовить обмотку с равновитковыми катушками, состоящими из 17 витков, расположенных один под другим по одностолбиковой схеме (рис. 40,а).

Но, основываясь на практическом опыте изготовления катушек с большим числом витков (при $W_K > 15$), весьма часто приходится отказываться от одностолбикового исполнения катушек, так как при этом получается слишком большой суммарный размер витковой изоляции по высоте столбика. При двухстолбиковом исполнении (рис. 40,б) для нашего примера должны получиться катушки с 16 и 18 витками.

С точки зрения выбора шага катушки по пазам и составления схемы обмотки, безразлично, на какое число витков (один или два) отличаются катушки. Поэтому при дальнейшем изложении материала этого раздела мы будем называть катушки с большим числом витков большими (б), а катушки с меньшим числом витков — малыми (м), вне зависимости от того, являются ли они одно- или двухстолбиковыми.

Из приведенных выше примеров, определяющих число эффективных проводников в пазу, следует, что в каждый паз должны быть помещены по одной катушечной стороне большой и малой катушек.

Для практического выполнения этого требования во всех пазах необходимо наличие определенных условий. Ниже мы рассмотрим несколько случаев образования симметричной двухслойной обмотки с неравновитковыми катушками.

Наиболее простой и весьма часто встречающийся случай — поочередное расположение больших и малых катушек — показан на рис. 41,а. Число пазов статора z

при этом обязательно должно быть четным (и, конечно, кратным трем, как вообще для любой симметричной трехфазной обмотки), так как число больших и малых катушек должно быть одинаковым. Но так как для трехфазной обмотки

$$z=6pq,$$

то z будет четным, если pq — целое число.

Как видно из рис. 41, а, верхние стороны больших катушек занимают все нечетные пазы, а нижние стороны

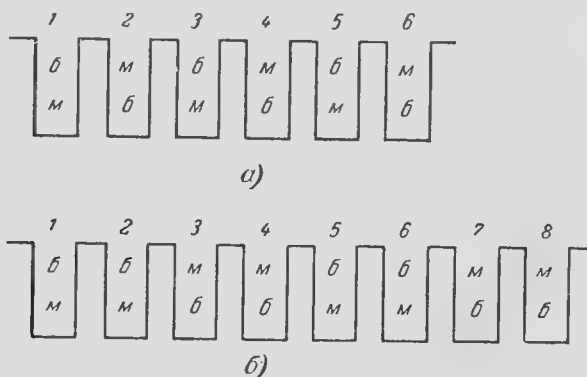


Рис. 41. Расположение неравновитковых катушек в пазах статора.

м — малые катушки; *б* — большие.

тех же больших катушек — четные пазы; т. е. шаг катушки должен быть обязательно нечетным (в нашем примере он равен пяти). В противном случае в одном пазу встретятся две стороны больших катушек, что технологически невыполнимо. Если необходимо уложить неравновитковые катушки с четным шагом (например, 1—5; шаг равен четырем), то применяют попарный способ укладки, при котором большие и малые катушки чередуются попарно, как это показано на рис. 41, б. Для этого способа укладки число z должно быть кратно четырем, так как каждой паре больших катушек должна соответствовать пара малых катушек. Таким образом, для этого способа $z=6pq$ — кратное четырем или pq — четное число, т. е. для обмоток с целым числом q обязательно должно быть четным одно из чисел p или q .

Рассмотрим вопрос образования параллельных ветвей в обмотках с неравновитковыми катушками. Напом-

уже более ограничены и выражаются условием:

$$\frac{P}{a} \text{ равно целому числу;}$$

и вообще этому условию подчиняется любая неравно-
витковая обмотка с попарным чередованием больших и
малых катушек, если $q/2$ будет целым нечетным числом.
Если же $q/2$ будет целым четным числом, то условие
образования параллельных ветвей будет таким же, как
и для обмотки с поочередным расположением больших
и малых катушек при целом и четном q .

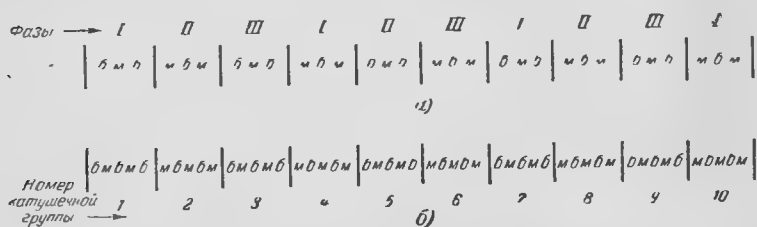


Рис. 43. Образование параллельных ветвей при нечетном q и поочередном способе укладки катушек.

Для нечетного числа катушек в катушечной группе при поочередном расположении больших и малых катушек, как это видно из рис. 43,а ($q=3$) и рис. 43,б ($q=5$) для обмотки с любым числом полюсов, все нечетные катушечные группы любой фазы состоят из $(q+1):2$ больших и $(q-1):2$ малых катушек, а все четные группы — из $(q+1):2$ малых и $(q-1):2$ больших. Следовательно, максимально возможное число параллельных ветвей уменьшится вдвое против такового в нормальной равнокатушечной обмотке и будет определяться условием:

$$\frac{P}{a} \text{ равно целому числу.}$$

На рис. 44 показано формирование катушечных групп из больших и малых катушек при попарном чередовании последних при $q=3$ (рис. 44,а) и $q=5$ (рис. 44,б) для обмотки с любым числом полюсов. При сравнении состава катушечных групп, например фазы I, замечаем, что группы 1, 4, 7 и 10, принадлежащие этой фазе, все разные.

Например при $q=5$ группы 1 и 10 состоят из трех больших катушек и двух малых, а группы 4 и 7, наоборот, из двух больших и трех малых; между собой группы 1 и 10, так же как и группы 4 и 7, отличаются относительным расположением больших и малых катушек внутри фазной зоны, поэтому суммарные э. д. с. катушечных групп 1 и 10, так же как и групп 4 и 7, будут разные (подробнее об относительном расположении катушек в фазной зоне и направлении э. д. с. отдельных

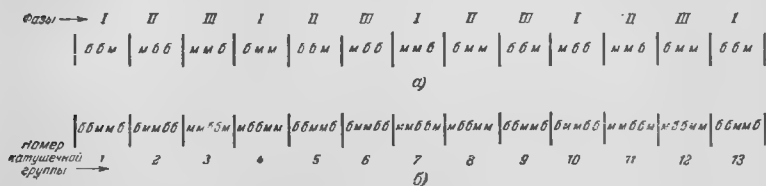


Рис. 44. Образование параллельных ветвей при нечетном q и попарно чередующемся способе укладки катушек.

катушек будет изложено в разделе несимметричных обмоток), поэтому из групп 1, 4, 7 и 10 нельзя образовывать параллельные ветви. И только группа 13 фазы I точно повторяет по числу больших и малых катушек и их относительному расположению внутри фазной зоны группу 1; следующая катушечная группа 14, принадлежащая фазе II, является идентичной группе 2 этой же фазы и т. д. Таким образом, в общем случае для нечетного q при попарном чередовании больших и малых катушек:

а) идентичные катушечные группы расположены через 12 групп;

б) в каждой фазе имеется по четыре вида различных катушечных групп.

Отсюда следует, что максимально возможное число параллельных ветвей в такой обмотке определяется отношением $2p/4$, а возможность выполнения обмотки с a параллельных ветвей определяется условием:

$$\frac{p}{a} \text{ равно четному числу.}$$

Все рассмотренные выше случаи образования параллельных ветвей в обмотке с неравновитковыми катушками относились к целому числу пазов на полюс и фазу. Если же число q будет дробным, то возможности обра-

зования параллельных ветвей еще более ограничены. Мы не будем подробно рассматривать эти случаи, так как они не часто встречаются в практике, но укажем, например, что для попарно чередующейся обмотки $q=1\frac{1}{2}$ (или для любого q со знаменателем дроби, равным двум) при образовании параллельных ветвей должно быть выполнено условие:

$$\frac{p}{4a} \text{ равно целому числу.}$$

Из этого условия, например, следует, что минимальное число полюсов машины, при котором возможно образовать две параллельные ветви, равно 16.

В заключение этого раздела следует заметить, что неравновитковые катушки с малым числом витков (два и три, три и четыре) требуют специальной конфигурации лобовых частей, обеспечивающей необходимый изоляционный зазор в лобовых частях обмотки при укладке катушек.



5. СХЕМЫ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБМОТОК С ДРОБНЫМ ЧИСЛОМ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

В предыдущих разделах рассматривались симметричные петлевые обмотки как с целым, так и с дробным числом пазов на полюс и фазу.

В таких обмотках э. д. с. всех фаз равны по величине и углы между следующими одна за другой фазами одинаковы. Так, для рассматриваемых нами трехфазных обмоток звезда фазовых э. д. с. графически изображена на рис. 45, где лучи (векторы) OA , OB и OC , представляющие собой суммарные э. д. с. фаз A , B и C , равны по величине и сдвинуты между собой на 120° .

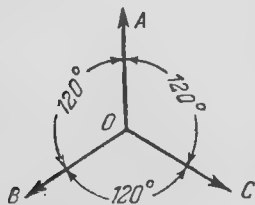


Рис. 45. Звезда фазовых э. д. с. трехфазной симметричной обмотки.

Эти условия не соблюдаются в несимметричных обмотках с дробным q , рассматриваемых в данном разделе.

Так как несимметрия может вызвать вибрацию машины, шум или увеличение токов, создающих дополнительное нагревание этих обмоток, то их избегают применять при проектировании электрических машин, а используют только в специальных случаях, например для уменьшения количества дорогостоящих штампов на заводе, применяя один и тот же штамп для машин одинакового габарита на разные числа полюсов.

Более часто с несимметричными обмотками приходится иметь дело в практике ремонтных цехов при необходимости перемотки двигателей с изменением числа полюсов; например, перемотка четырехполюсного двигателя с $z=48$ на шестиполюсный приводит к несимметрии в трехфазной обмотке.

Остановимся на этом примере и рассмотрим его с точки зрения существующих условий симметрии трехфазной обмотки.

В первом случае при $2p=4$

$$q = \frac{z}{m2p} = \frac{48}{3 \cdot 4} = 4.$$

При целом q трехфазная обмотка всегда симметрична, если число z кратно трем; т. е. четырехполюсная обмотка с $z=48$ симметрична. Во втором случае, при $2p=6$,

$$q = \frac{48}{3 \cdot 6} = 2\frac{2}{3}.$$

При дробном q существует два условия симметрии.

Согласно первому условию симметрии число полюсов должно быть кратным знаменателю дроби.

В данном примере число полюсов равно шести, следовательно первое условие выполняется.

Согласно второму условию симметрии знаменатель дроби не должен быть кратным числу фаз. В данном примере второе условие не выполняется. Эта обмотка будет несимметричной, несмотря на то, что в каждую фазу можно включить одинаковое число катушек (по 16).

К такому же выводу мы придем при рассмотрении любой трехфазной обмотки с дробным q при знаменателе дроби, кратном трем (при d , равном 3; 6; 9 и т. д.), т. е. все эти обмотки несимметричны.

В данном разделе мы и рассмотрим принцип составления схем несимметричных трехфазных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу.

Под принципом составления схем несимметричных обмоток следует понимать способ сведения величины несимметрии к минимуму, при котором явления, свойственные несимметричной обмотке (вибрация машины, шум, увеличенные токи), были бы практически незначительными.

Существуют практические критерии оценки степени несимметрии двигателей различной мощности и применения.

Так, обмотки, имеющие отклонение суммарных векторов э. д. с. фаз от идеального направления до $0,5^\circ$ и разницу в величине этих векторов до $1,5\%$, практически считаются симметричными.

Несимметрия в $2-3^\circ$ по углу или $2-3\%$ по величине между суммарными э. д. с. фаз обмотки считается допустимой для большинства установок, а для небольших двигателей (до 100 кВт) разница величины фазовых э. д. с. может достигать 5% и работа двигателя при этом не будет вызывать опасности.

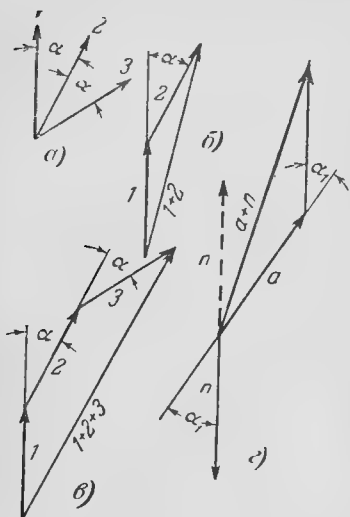
Тем не менее, при составлении схемы несимметричной обмотки всегда необходимо добиваться минимальных отклонений от идеальной звезды фазовых э. д. с.

Рис. 46. Сложение векторов э. д. с. катушек.

Принцип составления несимметричных схем проследим на нашем примере с $z=48$ и $2p=6$.

Перед тем как непосредственно перейти к изложению последовательности составления этой схемы, уясним некоторые элементарные положения теории обмоток электрических машин переменного тока.

Электродвижущая сила, наводимая в каждой катушке обмотки в данный момент времени, имеет не только определенную величину, но и направление и изображается в системе прямоугольных координат единичным лучом (вектором), причем величина вектора (длина луча) для всех катушек (имеется в виду обмотка с равновитковыми катушками) одинакова, а направление зави-



сит от их взаимного расположения в магнитном поле обмотки. Таким образом, в обмотке с z пазами (и, следовательно, с z катушками) существует z единичных векторов, каждый из которых характеризует э. д. с. одной катушки.

Вертикальное направление на чертеже вектора катушки I (рис. 46,а) условимся считать начальным направлением, от которого вправо по часовой стрелке располагаются катушечные векторы всех остальных катушек.

Угол α между соседними векторами, изображающими э. д. с. соседних катушек, называется пазовым углом и определяется по формуле

$$\alpha = \frac{180 \cdot 2p}{z}, \text{ эл. град.}$$

Так, для разбираемого нами примера

$$\alpha = \frac{180 \cdot 6}{48} = 22,5 \text{ эл. град.}$$

О связи между электрическими и геометрическими градусами мы уже упоминали в начале брошюры. Выразим это соотношение формулой

$$\alpha = p\alpha',$$

где α' — тот же пазовый угол, выраженный в геометрических градусах.

Для нашего примера

$$\alpha' = \frac{\alpha}{p} = \frac{22^\circ 30'}{3} = 7^\circ 30'.$$

И действительно, центральный угол между соседними пазами в статоре с $z=48$

$$\alpha' = \frac{360}{48} = 7^\circ 30'.$$

В дальнейшем изложении все углы будем считать в электрических градусах.

Далее, из единичных катушечных векторов образуется суммарный вектор катушечной группы. Сложение катушечных векторов в нашем примере (при $q=2^{2/3}$ кату-

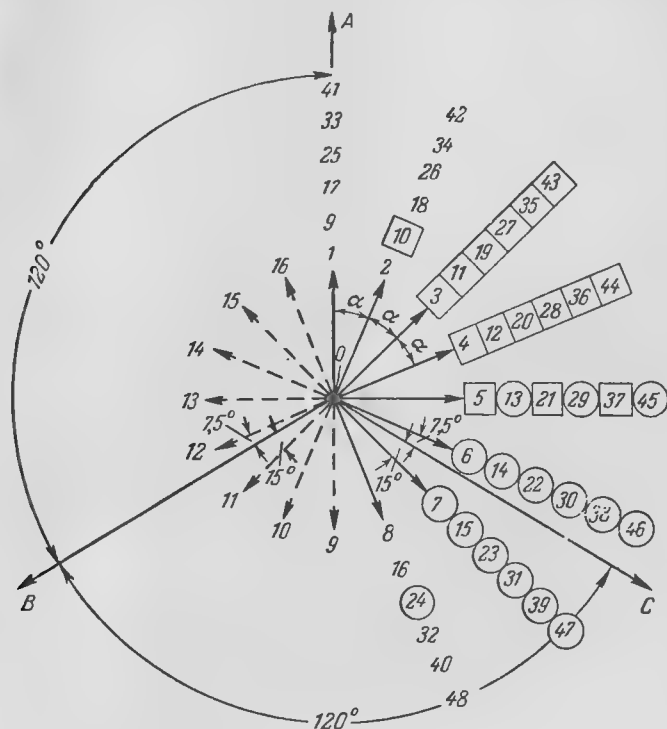
шечные группы могут состоять из двух и трех катушек) показано на рис. 46,б, в. Затем, складывая катушечные векторы, получаем суммарные векторы фаз, образующие звезду фазовых э. д. с. примерно такого же вида, как это представлено на рис. 45. При сложении векторов катушечных групп или сложении векторов отдельных катушек, находящихся в разных катушечных группах, так же, как и в практике соединения катушечных групп в схеме обмотки, могут иметь место случаи соединения конца с началом — тогда сложение векторов производится так же, как показано на рис. 46,б, в для катушечных векторов, а также случаи соединения конца с концом или начала с началом — тогда сложение векторов производится так, как показано на рис. 46,г. Здесь как мы видим, направление вектора n изменено на обратное, что соответствует действительному направлению э. д. с. при соединении катушечных групп одноименными выводами (конец с концом или начало с началом).

Составление схемы для нашего примера ($z=48$, $2p=6$, $q=2^2/3$) начнем с построения звезды фазовых (катушечных) э. д. с., которая состоит из катушечных векторов всех катушек обмотки, последовательно сдвинутых между собой на фазовый угол, равный $22^\circ 30'$ (рис. 47). Производя построение, замечаем, что вектор э. д. с. катушки 9, будучи согласно вышеприведенному правилу изменен на обратный, полностью совпадает с вектором катушки 1; вектор катушки 10 также совпадает с вектором катушки 2 и т. д. Кроме того, вектор катушки 17 полностью повторит вектор катушки 1; вектор катушки 18 также повторит вектор катушки 2 и т. д. В результате для изображения полной звезды катушечных э. д. с. оказалось достаточным построить всего восемь векторов, а номера векторов остальных катушек обмотки приписать около соответствующих, совпадающих с ними векторов, как это сделано на рис. 47.

Эти восемь векторов иногда называют векторами-представителями, поскольку каждый из них представляет несколько катушек, а все они вместе представляют все катушки данной обмотки.

Число векторов-представителей для любой трехфазной обмотки с дробным q при знаменателе дробности d , кратном трем, всегда равно dq . Так, в нашем примере $q=2^2/3$, $d=3$, число векторов — представителей $dq=3 \cdot 2^2/3=8$.

Ряд векторов включает все катушечные векторы, соответствующие какому-либо вектору-представителю, имеет номер этого представителя. Так, например, ряд (рис. 47) состоит из катушечных векторов 3, 11, 19, 35, 43.



Для распределения катушек по фазам на построенную звезду катушечных векторов наложим идеальную трехфазную звезду ABC (рис. 47), имеющую сдвиг между лучами фаз в 120° , совместив при этом луч фазы A с начальным направлением звезды катушечных э. д. с., совпадающим с вектором катушки 1.

6-2670

чем на 30° . (Разумеется, учитывается как прямое, так и обратное направление вектора.)

В соответствии с этим правилом предварительно отнесем к фазе *A* ряды 1, 2 и 8 (обратное направление ряда 8 совпадает с направлением вектора 16, который сдвинут от луча фазы *A* на $22,5^\circ$); к фазе *B* — ряды 3, 4; к фазе *C* — ряды 6 и 7.

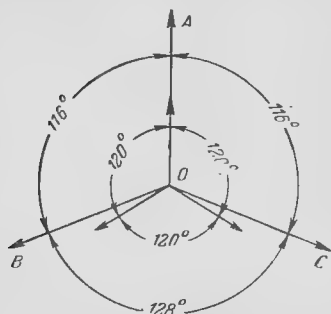


Рис. 48. Предварительная звезда фазовых э. д. с.

Оставшийся ряд 5 одинаково отклонен на 30° от фазы *C* (прямое направление ряда) и от фазы *B* (обратное направление ряда). Для соблюдения симметрии фаз *B* и *C* по отношению к фазе *A* катушечные векторы ряда 5 поделим пополам между фазами *B* и *C*. К каждой из этих фаз можно отнести три катушечные вектора этого ряда, например, к фазе *B* — векторы 13, 29 и 45, а к фазе *C* — векторы 5, 21 и 37.

В итоге после предварительного распределения имеем:

в фазе <i>A</i> —	18 катушечных векторов
в фазе <i>B</i> —	15 " "
в фазе <i>C</i> —	15 " "

По полученным предварительным данным путем графического сложения векторов приведенным на рис. 46 способом строим звезду фазовых э. д. с. и для сравнения на этом же чертеже проводим направление лучей идеальной звезды фазовых э. д. с., как это показано на рис. 48.

Описываемый способ составления схем несимметричных обмоток является графическим, т. е. все интересующие нас величины определяются путем непосредственных измерений на чертеже. Поэтому все графические построения следует производить с особой тщательностью и лучше всего на миллиметровой бумаге. Масштаб чертежа необходимо выбрать по возможности более крупным (так, для построений в разбираемом нами примере длину единичного катушечного вектора на чертеже следует взять равной не менее 1 см).

При соблюдении этих требований графический способ дает возможность решить задачу с достаточной точностью для практических целей.

Произведя соответствующие измерения длин суммарных фазовых векторов и углов между ними в предварительной звезде фазовых э. д. с. (рис. 48), получим следующие данные:

$$\begin{array}{llll} \text{Длина фазового вектора } OA = 17 & \text{отн. ед.} & & \\ \text{" " " " } OB = 14,3 & \text{" " " "} & & \\ \text{" " " " } OC = 14,3 & \text{" " " "} & & \\ \angle BOC = 128^\circ, \angle AOB = 116^\circ, \angle AOC = 116^\circ & & & \end{array}$$

Разумеется, такая трехфазная система с разницей в 12° по углу и в 16% между длинами фазовых векторов не может считаться допустимой.

Из сравнения полученной предварительной звезды фазовых э. д. с. с идеальной системой делаем выводы:

а) предварительная звезда фазовых э. д. с. симметрична относительно вектора фазы A ;

б) вектор фазы A следует укоротить, а фаз B и C соответственно удлинить;

в) $\angle BOC$ следует сузить, повернув векторы B и C по направлению соответствующих лучей идеальной звезды на определенный угол.

Но так как при предварительном распределении рядов векторов по фазам в фазу A вошло 18 катушечных векторов, а в фазы B и C по 15, то, естественно, следует из фазы A исключить две катушки и включить их по одной в фазы B и C ; этим мы выполним требование п. «б» вышеприведенных выводов. Этим же действием мы выполняем и требование п. «в», так как любой катушечный вектор рядов, 1, 2 и 8, составляющих фазу A , будучи включен в фазу B или C (учитывается как прямое, так и обратное направление этого вектора), т. е. будучи сложен известным нам способом с фазовым вектором B или C , произведет поворот этих векторов в требуемом п. «в» направлении.

Какие же два вектора следует исключить из фазы A ? Не нарушая положения п. «а» вышеприведенных выводов (желательно сохранить симметрию системы относительно вектора фазы A), возможны два варианта подбора векторов, подлежащих исключению из фазы A .

Первый вариант. Оба вектора взять из ряда 1. При этом безразлично — какой из них включить в фазу B , а какой — в фазу C , так

как относительное расположение векторов ряда 1 к векторам фаз B и C одинаково.

Второй вариант. Один вектор взять из ряда 2, а второй — из ряда 8. При этом возможны два случая: первый случай — в фазу B включить вектор из ряда 2, а в фазу C вектор из ряда 8, второй случай — наоборот, в фазу C включить вектор из ряда 2, а в фазу B вектор из ряда 8.

Прodelав несложные графические построения по первому варианту и произведя измерения, получаем:

- а) длина фазового вектора $OA = 15,1$ отн. ед.
 $OB = 14,8$ " "
 $OC = 14,8$ " "
 б) $\angle BOC = 114^\circ$, $\angle AOB = 123^\circ$, $\angle AOC = 123^\circ$

Несмотря на вполне благоприятное соотношение длин фазовых векторов (разница всего в 2%), этот вариант не приемлем, так как разница между углами в 9° дает степень несимметрии системы, превышающую допустимую.

Очевидно, что графических построений для второго случая второго варианта можно и не производить, так как, например, вектор ряда 2 отклонит фазовый вектор C на еще больший угол, чем это имело место в первом варианте, когда в фазу C включался вектор из ряда 1.

То же самое можно сказать и о фазе B , если в нее включить вектор из ряда 8. В результате получим систему, в которой $\angle BOC$ будет еще меньше, чем в первом варианте, а степень несимметрии больше.

На рис. 49 произведено графическое построение для первого случая второго варианта. При выполнении этого построения на миллиметровой бумаге с масштабом единичного вектора, равным 1 см, измерение длин фазовых векторов и углов между ними дает следующие результаты:

- а) длина фазового вектора $OA = 15,2$ отн. ед.
 $OB = 15,3$ " "
 $OC = 15,3$ " "
 б) $\angle BOC = 121^\circ$, $\angle AOB = 119^\circ 30'$, $\angle AOC = 119^\circ 30'$

Схема обмотки, характеризующаяся такой системой векторов, может считаться практически симметричной, так как фазовые векторы почти равны по длине (разница около 0,5%), а разница в углах всего $1,5^\circ$ (при этом наибольшее отклонение фазового вектора от направления луча идеальной трехфазной звезды составляет только $0,5^\circ$).

Как видно из этого рисунка, в фазу B включена из ряда 2 катушка 10. Понятно, что вместо нее могла быть взята любая другая катушка ряда 2 и от этого симметрия схемы нисколько бы не нарушилась. При выборе этой катушки преследовалась цель более равномерного распределения катушек в катушечных группах. Так, например, если бы вместо катушки 10 мы взяли катушку 18 из этого же ряда, то, как видно из рис. 47, рядом лежащие катушки 18, 19, 20 и 21, входящие все в фазу B , должны были бы оказаться в одной катушечной группе, т. е. катушечная группа состояла бы из четырех катушек. Это нежелательно, так как при данном $q=2^{2/3}$ лучше, если катушечные группы будут только двух- и трехкатушечными. Руководствуясь этими соображениями, вместо катушки 10 можно было бы взять катушку 25 или 42 и не следует брать катушки 2, 18 и 34.

То же самое можно сказать о выборе катушки 24 из ряда 8 для включения в фазу C .

Теперь осталось записать чередование катушечных групп по окружности статора и составить схему обмотки одним из известных нам упрощенных способов. Для этого выпишем все z номеров катушек обмотки (рис. 50,а) и распределим их по фазам в соответствии с диаграммой рис. 47, пользуясь теми же условными обозначениями.

В результате получаем следующее чередование катушечных групп по окружности статора:

3 3 2 2 3 3 3 3 3 2 2 3 3 3 2 3 2 3.

Упрощенная схема полученной обмотки при $2p=6$, $z=48$, $q=2^{2/3}$, $a=1$ представлена на рис. 50,б.

Способ построения схемы несимметричной обмотки для разобранным нами конкретного примера с успехом может быть применен для любой несимметричной схемы петлевой обмотки статора. Следует только оговорить, что в отдельных случаях в процессе построения звезды фазовых э. д. с. возможны некоторые отступления от тех основных положений, которыми мы пользовались в данном примере. Так, при корректировке первоначальной звезды фазовых э. д. с. в нашем примере нам удобно было сохранить направление вектора фазы A совпадающим с начальным направлением звезды катушечных э. д. с. Корректировка звезды фазовых э. д. с. производилась за счет разворота фазовых векторов двух дру-

гих фаз B и C ; при этом мы не нарушали симметрии системы относительно луча фазы A . Вполне возможны случаи, когда от этого принципа целесообразно отступить, т. е. производить корректировку звезды фазовых э. д. с. за счет поворота на некоторый угол всех трех

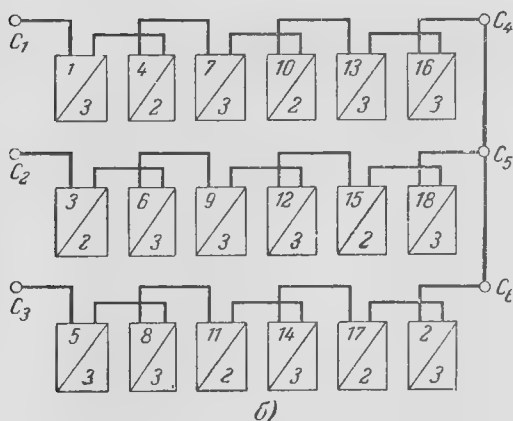
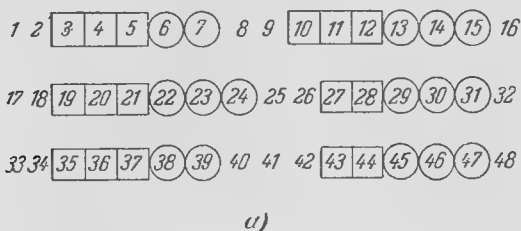


Рис. 50. Схема несимметричной обмотки.
 $2p=6$; $z=48$; $q=2^2/3$; $a=1$.

фазовых векторов, если после выполнения графических проб не удалось (в случае сохранения симметрии системы относительно луча фазы A) добиться желаемых результатов.

Также не является совершенно обязательным включение в каждую фазу одинакового числа катушек. Вполне допустимы случаи, когда одна из фаз будет содержать на две-три катушки больше или меньше, чем две другие фазы, а звезда фазовых э. д. с. при этом получится практически симметричной.

Для достижения малой (допустимой) степени несимметрии иногда целесообразно вовсе исключить из схемы некоторое число катушек. К этому приему следует относиться весьма осторожно. Исключение большого числа катушек из схемы, если это и приведет к определенным результатам с точки зрения получения практически симметричной системы, все же может резко уменьшить длины фазовых векторов, что равносильно снижению мощности машины. Однако существуют заводские исполнения

несимметричных обмоток крупных двигателей, в которых исключено из схемы до 5—6% катушек.

Иллюстрацией к последним двум положениям может служить рис. 51, на котором изображена результирующая звезда фазовых э. д. с. несимметричной обмотки статора синхронного двигателя типа ДСК-213/39-36 мощностью 625 квт, напряжением 6 кв и скоростью вращения 167,5 об/мин.

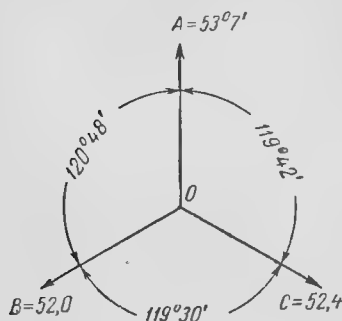


Рис. 51. Звезда фазовых э. д. с. синхронного двигателя типа ДСК-213/39-36.
 $2p=36$; $z=180$; $q=1\frac{2}{3}$.

Приведенная на этом рисунке система с достаточно малой степенью несимметрии получена путем исключения из схемы 10 катушек: двух из фазы А и по четыре из фаз В и С.

Таким образом, фаза А имеет на две катушки больше, чем фазы В и С; число удаленных из схемы обмотки катушек составляет 5,5%.

Обычно при дробном числе пазов на полюс и фазу

($q = b \frac{p}{d}$) катушечные группы состоят: малые — из b

катушек, больше — из $(b+1)$ катушек. При составлении схем несимметричных обмоток возможны случаи, когда катушечные группы получаются трех видов и состоят из b , $(b+1)$ и $(b+2)$ катушек. В разобранный нами выше примере построения несимметричной обмотки на определенном этапе мы сталкивались с такой возможностью получения катушечных групп, состоящих из четырех катушек (при $q=2\frac{2}{3}$).

Мы указывали, что такое формирование катушечных групп не является желательным, и в нашем примере имелась возможность избежать этого без ухудшения конечных результатов. Но в некоторых случаях бывает целесообразно ввести в обмотку несколько катушечных групп, состоящих из $(b+2)$ катушек, если обычный способ формирования катушечных групп не приводит к желаемым результатам.

Далее обратимся к полученному нами при составлении схемы несимметричной обмотки двигателя с $2p=6$, $z=48$ и $q=2^{2/3}$ чередованию катушечных групп по окружности статора:

332233333223332323

Общее число катушек этого ряда составляет 48, т. е. включает все катушки данной обмотки. Легко заметить, что это чередование не имеет периода, что весьма характерно для большинства несимметричных схем машин со сравнительно небольшим числом пазов. Отсутствие периодичности в чередовании катушечных групп указывает на невозможность в данной обмотке образования параллельных ветвей.

В случае необходимости образования в несимметричной обмотке параллельных ветвей поступают следующим образом.

Если в обмотке должны быть две параллельные ветви, то схема составляется для половинного числа полюсов с участием половинного числа пазов (и катушек) статора при сохранении числа пазов на полюс и фазу. От введения этого условия несколько не изменяется вид звезды пазовых э. д. с., только число векторов в каждом ряду уменьшится в 2 раза по сравнению с действительным. Вторая половина катушек образует в точности повторяющуюся звезду фазовых э. д. с., т. е. вторую параллельную ветвь.

И вообще, если обмотка должна иметь a параллельных ветвей, то составление схемы несимметричной обмотки (построение звезды фазовых э. д. с.) производится только для $2p/a$ полюсов этой обмотки и соответственно для z/a пазов статора. Остальные части обмотки полностью повторяют звезду фазовых э. д. с., построенную для первой части обмотки.

Разумеется, в данной обмотке возможно образовать a параллельных ветвей только в случае, если числа $2p/a$ и z/a будут целыми,

Этим приемом деления всей обмотки на несколько частей можно пользоваться и в том случае, когда не требуется образования параллельных ветвей, т. е. для составления полностью последовательной схемы.

Разница в результирующих (суммарных) звездах фазовых э. д. с. всей обмотки будет только та, что при параллельной схеме длины фазовых векторов после суммирования фазовых векторов всех частей обмотки не увеличиваются, т. е. остаются такими же, какими они

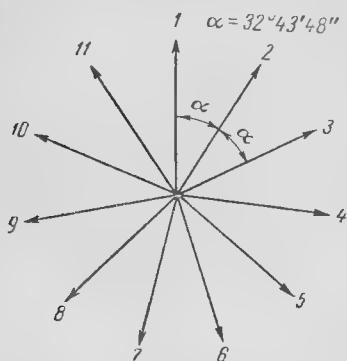


Рис. 52. Звезда фазовых э. д. с. несимметричной обмотки.

$2p=36$; $z=198$; $q=1\frac{5}{6}$; $a=2$.

были получены при построении первой части обмотки, а при последовательной схеме результирующие фазовые векторы получаются длиннее фазовых векторов первой обмотки во столько раз, на сколько частей была разбита вся обмотка.

Прием деления обмотки на части для образования последовательной схемы обычно пользуются при составлении схем со сравнительно большим числом z (более 120), с тем чтобы часть обмотки, выделенная

для построения звезды фазовых э. д. с., включала достаточное число катушек (векторов) для осуществления искусственных приемов симметрирования системы. Разумеется, чем больше катушек (катушечных векторов) участвует в построении, тем больше возможностей добиться минимальной несимметрии системы. Но, с другой стороны, при слишком большом числе катушек усложняются графические и вычислительные операции, в то время как и при меньшем числе катушечных векторов бывает возможным добиться вполне устраивающей, допустимой несимметрии обмотки.

Приведенные соображения всегда следует учитывать при составлении схем несимметричных обмоток с определенными требованиями в отношении степени допустимой несимметрии. На рис. 52 представлена звезда фазовых э. д. с. несимметричной обмотки ($2p=36$, $z=198$, $q=1\frac{5}{6}$).

Число векторных рядов (равное числу векторов —

представителей) данной обмотки по общему правилу равно:

$$dq = 1 \frac{5}{6} \cdot 6 = 11.$$

Соответственно пазовый угол

$$\alpha = \frac{180 \cdot 2p}{z} = \frac{180 \cdot 36}{198} = \frac{360^\circ}{11} = 32^\circ 43' 48''.$$

Для образования двух параллельных ветвей разделим эту обмотку на две равные части; тогда в графических построениях будут участвовать не все 198 катушек данной обмотки, а только 99, которые распределяются по векторным рядам следующим образом:

Ряд 1 — катушки	1, 12, 23, 34, 45, 56, 67, 78, 89
Ряд 2	2, 13, 24, 35, 46, 57, 68, 79, 90
...	...
Ряд 11	11, 22, 33, 44, 55, 66, 77, 88, 99

Решив задачу для первой половины обмотки, получим результирующую звезду фазовых э. д. с. и чередование катушечных групп первой половины обмотки по окружности статора.

Очевидно, что из второй половины обмотки, включающей катушки с номерами 100 по 198, может быть получена точно такая же звезда фазовых э. д. с. и чередование катушечных групп по окружности статора, т. е. образована вторая параллельная ветвь.

При выборе способа соединения фаз несимметричных обмоток следует избегать соединения их в треугольник, особенно в обмотках со сравнительно большой (хотя и допустимой) степенью несимметрии, так как при этом могут возникать значительные уравнивающие токи, увеличивающие нагрев обмотки.

Кроме разобранных нами графического способа построения схем несимметричных обмоток существуют также способы табличный и аналитический. Аналитический способ по сравнению с графическим более точен с точки зрения определения конечных величин — длин фазовых векторов и углов между ними, так как расчеты дают более точные результаты, чем измерения. Но с точки зрения решения существа задачи, т. е. распределения катушек в катушечные группы и формирования самой

обмотки, результаты, получаемые аналитическим способом, практически не отличаются от таковых при графическом способе.

С другой стороны, графический способ более прост, нагляден и требует от исполнителя самой элементарной математической подготовки, в то время как аналитический требует более глубоких знаний математики.

Табличный способ основан на определении чередования катушечных групп по окружности статора по специальным таблицам, составленным для различных значений чисел $2p$ и дробной части числа q .

Решение задачи этим способом, конечно, занимает меньше времени, чем аналитическим или графическим, но, к сожалению, не всегда приводит к желаемым результатам. Это объясняется тем, что различные значения целой части числа q все-таки требуют принципиально различного распределения катушек по катушечным группам, в то время как табличный способ основан на аналогичном распределении катушек по группам для обмоток с различными значениями целой части числа q (например, для $q=1\frac{2}{3}$ и $q=3\frac{2}{3}$).

Так, произведенной проверкой установлено, что некоторые несимметричные схемы, составленные табличным способом, имеют степень несимметрии около 10%. Таким образом, пользоваться этим способом для составления ответственных схем с требованием минимально возможной для данной обмотки степени несимметрии не рекомендуется.

Более подробно с табличным способом составления схем несимметричных обмоток можно познакомиться в [Л. 5].

В заключение настоящего раздела приведем два примера определения степени несимметрии обмотки.

Пример 1. Звезда фазовых э. д. с. (рис. 49):

а) несимметрия по углу (наибольшее отклонение фазового угла от 120° составляет $\angle BOC=120^\circ 40'$):

$$\frac{120 \frac{2^\circ}{3} - 120^\circ}{120^\circ} \cdot 100 = 0,55\%;$$

б) несимметрия по длине фазовых векторов:

$$\frac{15,27 - 15,24}{\left(\frac{15,27 + 15,24}{2}\right)} \cdot 100 = 0,2\%.$$

Пример 2. Звезда фазовых э. д. с. (рис. 51):

а) несимметрия по углу (наибольшее отклонение фазового угла от 120° составляет $\angle AOB = 120^\circ 48'$):

$$\frac{120,8^\circ - 120^\circ}{120^\circ} \cdot 100 = 0,67\%;$$

б) несимметрия по длине фазовых векторов (определяется по наибольшей разнице между длинами фазовых векторов):

$$\frac{53,7 - 52,0}{\left(\frac{53,7 + 52,0}{2}\right)} \cdot 100 = 3,2\%.$$



ЛИТЕРАТУРА

1. Бабенко Д. А., Тепленко С. И. и Чибишев Л. Д., В помощь электрику-обмотчику асинхронных электродвигателей, изд-во «Энергия», 1956.

2. Виноградов Н. В., Производство электрических машин, Госэнергоиздат, 1961.

3. Зимин В. И., Каплан М. Я. и др., Обмотки электрических машин, Госэнергоиздат, 1961.

4. Кокорев А. С. и Наумов И. Н., Справочник молодого обмотчика электрических машин, изд-во «Высшая школа», 1964.

5. Лившиц-Гарик М., Обмотки машин переменного тока, Госэнергоиздат, 1959.

6. Рубо Л. Г., Пересчет и ремонт асинхронных электродвигателей мощностью до 100 кВт, Госэнергоиздат, 1961.

7. Рубо Л. Г. и Маршак Е. Л., Монтаж обмоток электрических машин высокого напряжения, изд-во «Энергия», 1964.



Отзывы и пожелания по данной брошюре присылайте по адресу: Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10, издательство «Энергия», Библиотека электромонтера.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие сведения	3
1. Развернутые схемы однослойных обмоток	15
2. Развернутые схемы двухслойных обмоток	30
3. Упрощенные способы изображения схем обмоток	46
4. Схемы двухслойных обмоток с неравновитковыми катуш- ками	61
5. Схемы несимметричных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу	68
Литература	85



ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ

- Устинов П. И.* Ремонт стационарных свинцово-кислотных аккумуляторов. Вып. 190.
- Ларионов В. П.* Защита жилых домов и производственных сооружений от молнии. Изд. 2-е. Вып. 191.
- Бариев Н. В.* Электрооборудование строительных экскаваторов. Вып. 192.
- Ивенский Ю. Н., Новик И. К. и Фуремс А. А.* Монтаж электрооборудования на станках и автоматических линиях. Вып. 193.
- Гельман Р. Е.* Магнитные пускатели. Вып. 194.
- Апольцев Ю. А.* Эксплуатация синхронных компенсаторов. Вып. 195.
- Белов Г. В.* Ошинковка распределительных устройств гибкими проводами. Вып. 196.
- Демский В. С.* Как определить место повреждения в силовом кабеле. Вып. 197.
- Мерман И. А.* Механизмы и приспособления для установки опор линий. Вып. 183.
- Левченко М. Т. и Черняев П. Д.* Индукционные реле тока. Вып. 199.
- Голубев М. Л.* Реле прямого действия. Вып. 200.
- Зевакин А. И.* Комплектные трансформаторные подстанции 6—10/0,4 кв.
- Найфельд М. Р.* Что такое заземление и защитные меры безопасности. Изд. 2-е. Вып. 202.
- Вавин В. Н.* Трансформаторы тока. Вып. 203.
- Маршак Е. Л.* Ремонт обмоток статоров электрических машин переменного тока. Вып. 204.

Издательство «Энергия» заказов на книги не принимает и книг не высылает.

Книги, выходящие массовым тиражом, высылают наложенным платежом без задатка отделения «Книгой — почтой».

*Маршак Евсей Львович,
Уманцев Рудольф Борисович*

Схемы обмоток статоров,

Редактор *Г. Г. Родин*

Техн. редактор *Н. С. Мазурова*

Корректор *З. Б. Шлайфер*



Сдано в набор 17/X 1966 г.

Подписано к печати 31/XII 1966 г.

Бумага типографская мелованная 84×108¹/₃₂

Физ. печ. л. 2,75

Усл. печ. л. 4,62

Т-16857

Уч.-изд. л. 4,33

Тираж 15 000 экз.

Цена 16 коп.

Зак. 2670

Издательство «Энергия», Москва, Ж-114,
Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10,

Цена 16 коп.